



Titre: Analyse du comportement de la Rivière-des-Prairies dans un
Title: contexte de changements climatiques

Auteur: Sonia Kadi
Author:

Date: 2013

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Kadi, S. (2013). Analyse du comportement de la Rivière-des-Prairies dans un
Citation: contexte de changements climatiques [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/1149/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/1149/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:** Musandji Fuamba
Advisors:

Programme: Génie civil
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ANALYSE DU COMPORTEMENT DE LA RIVIÈRE-DES-PRAIRIES DANS
UN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES

SONIA KADI

DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION

DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES

(GÉNIE CIVIL)

JUILLET 2013

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

ANALYSE DU COMPORTEMENT DE LA RIVIÈRE-DES-PRAIRIES DANS
UN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Présenté par : KADI Sonia

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. LECLERC Guy, Ph.D., président

M. FUAMBA Musandji, Ph.D., membre et directeur de recherche

Mme DORNER Sarah, Ph.D., membre

DÉDICACE

Je dédie ce modeste travail à

Mes chers parents pour leur affection et leur support

Mes deux sœurs et mon frère

Mon cher mari Soufiene Rouine

Ma chère sœur Frédérique Gagnon

Mes amis

Tous ceux qui me sont chers

REMERCIEMENTS

J'adresse mes profondes gratitude à mon encadreur M. Musandji Fuamba qui m'a soutenue, encouragée et supportée.

J'adresse mes profonds remerciements à M. Mourad Heniche, M. Jean Bélanger et M. Yves Secretan pour leurs soutiens. Je remercie également tous mes collègues du département de Génie civil option Hydraulique.

Un spécial remerciement à mes collègues Essoyéké Batchabani, Youssef Bentaib, Abdou Seck, Farshid Jahanfakhr et Mathieu Roy pour leur support, leur soutien et leur aide précieuse.

J'associe à ces remerciements toute personne qui m'a aidée de proche ou de loin dans l'accomplissement de ce travail, plus spécialement à ma collègue Elsa Somrain.

RÉSUMÉ

Les impacts générés par les changements climatiques représentent un aléa majeur aux infrastructures hydrauliques existantes ainsi qu'aux plaines inondables.

Les études d'impacts du climat futur sur les cours d'eau et leurs conséquences sur les bâtis existants sont nécessaires pour mettre en place des mesures appropriées, en vue de garantir la protection des biens et de la population occupant les zones riveraines contre les risques de débordement des rivières.

La présente étude à vocation théorique a pour objectif principal, l'analyse du comportement de la Rivière-des-Prairies, dans le contexte des changements climatiques. Afin d'évaluer les apports dans le bassin versant en amont de cette rivière, le modèle hydrologique *Hec-Hms* a été utilisé dans l'estimation des débits futurs à partir des précipitations du climat futur (2041-2070). Une modélisation hydraulique de la rivière a été mise en œuvre avec le logiciel bidimensionnel *Modeleur Hydrosim*. La simulation des niveaux d'eau dans le climat 2041-2070 a permis d'identifier les zones vulnérables aux inondations du côté de l'île de Montréal, et de dégager ainsi l'impact du rehaussement du niveau de la rivière sur les ponts enjambant la Rivière-des-Prairies.

Les résultats des simulations numériques effectuées montrent que le rehaussement du niveau de la rivière n'aura pas de conséquences majeures sur les ponts, étant donné que les niveaux d'eau dans les sections des ponts sont inférieurs aux élévations des tabliers.

Les inondations probables qui seraient causées par les changements climatiques auront un impact majeur sur le terrain montréalais (l'impact des changements climatiques sur les berges du côté de l'île de Laval n'a pas été le sujet de la présente étude). Les zones situées du côté amont du barrage d'Hydro-Québec ainsi que les zones au voisinage du pont Charles-de-Gaulle (extrême partie en aval du barrage) représentent les lieux les plus vulnérables quant au risque d'inondation.

Clés : Rivière-des-Prairies, changements climatiques, rehaussement, modèle hydrologique, modèle hydraulique.

ABSTRACT

The climate changes constitute the major risk which threatens the floodplains and the infrastructures. The study of the impact of the future climate is important to implement appropriate measures of protection for the property and population. The study of the impacts of the floods associated to a recurrence on Rivière-des-Prairies was studied by authorities and inundation maps have been emerged. However, the study of the impact of future climate on the behavior of rivers constitutes a new subject under study and development.

The main objective of this study is to analyse the impact of future climate on the infrastructure of the Rivière-des-Prairies and the area located in the vicinity of the river in the context of climate change. To assess the contribution of watershed upstream of the river, the hydrological model *Hec-Hms* was used to estimate future flows discharges based on the transformation of the hyetograph into flows hydrograph for the climate 2041-2070.

Hydraulic modeling of the river was done with the 2D software *Modeleur Hydrosim*. Simulation of water levels in the climate 2041-2070 climate was mapped; delineation of the areas which are considered as the area's most threaten by inundation and the impact of water rise on the bridges was analyzed.

Indeed, water level rise will not have a major impact on the bridges, as water levels in bridges sections are below bridge deck's elevation. However the climate change might cause the inundation of the most of the land located near the river (Montreal Island). The areas which are located upstream of the dam and near the Charles de Gaulle bridge (extreme part downstream the dam) represent the land's most vulnerable to the risk of flooding.

Keys: Rivière-des-Prairies, climate change, water level rises, hydrological and hydrodynamic models

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT.....	VI
TABLE DES MATIÈRES	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	X
LISTE DES FIGURES.....	XI
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XIII
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Problématique.....	1
1.2 Objectifs et hypothèse	1
1.3 Plan et contenu du mémoire	2
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	3
2.1 Études antérieures sur les impacts dus aux changements climatiques	3
2.3 Étude hydrologique	4
2.4 Le climat futur	6
2.4.1 Introduction	6
2.4.2 La génération du climat futur : Les Modèles climatiques	7
2.4.2.1 Les modèles atmosphère-océan.....	7
2.4.2.2 Les modèles de Circulation Général (MCG).....	7
2.4.2.3 Méthodes de mise à l'échelle (MRC)	8
2.4.2.4 Méthode des courbes IDF (approche de Mailhot).....	8
2.4.2.5 Scénarios de changements climatiques	9

2.4.3	Impacts des changements climatiques sur le Québec et le Canada.....	10
2.5	Étude hydraulique	12
2.5.1	Introduction	12
2.5.2	Historique de la modélisation hydraulique de la Rivière-des-Prairies	13
CHAPITRE 3	PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE	14
3.1	Introduction	14
3.2	Présentation de la zone d'étude et caractéristiques du bassin versant.....	14
3.3	Hydrologie du bassin versant de la Rivière-du-Nord.....	17
3.2.1	Présentation du bassin versant de la Rivière-du-Nord	17
3.2.2	Présentation de l'archipel de Montréal.....	22
CHAPITRE 4	MÉTHODOLOGIE	23
4.1	Introduction	23
4.2	Modélisation du climat futur	23
4.3	Étude hydrologique	24
4.3.1	Caractéristiques du bassin versant.....	24
4.3.2	Données météorologiques	25
4.3.3	Transformation des pluies – débits.....	26
4.3.3.1	Présentation du modèle choisi.....	26
4.3.3.2	Les composantes du modèle Hec Hms.....	27
4.3.3.3	Étalonnage et validation du modèle	29
4.4	Modélisation hydraulique des rivières	29
CHAPITRE 5	ÉTUDE DE CAS.....	31
5.1	Évaluation des apports du bassin versant en climat futur	31
5.1.1	Inventaire des données	31

5.1.2	Délimitation du bassin de la Rivière-du-Nord avec Hec Hms	34
5.1.3	Composantes de l'hydrogramme de ruissellement direct	36
5.1.4	Étalonnage et validation	42
5.1.5	Simulation de la pluie future du bassin versant de la Rivière-du-Nord Simulation de la pluie future de Chicago	43
5.1.6	Hydrologie des affluents de la rivière des Outaouais.....	46
5.2	La modélisation de la Rivière-des-Prairies	49
5.2.1	Données disponibles.....	49
5.2.4	Calage du MNT de la Rivière-des-Prairies	50
5.2.5	Simulations des niveaux d'eau.....	52
5.2.5.1	Simulation Qmax et Qmoy.....	52
5.2.5.2	Résultats des simulations	52
5.3	Analyse de sensibilité du niveau de la Rivière-des-Prairies	65
CHAPITRE 6	ANALYSE ET DISCUSSION DES RÉSULTATS.....	66
BIBLIOGRAPHIE	74

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Comparaison entre modèles globaux et modèles distribués.....	6
Tableau 2.2: Pourcentage de majoration des pluies du climat de référence	9
Tableau 2.3: Changements saisonniers des températures et précipitations	11
Tableau 2.4 : Changements saisonniers des températures et précipitations (suite)	12
Tableau 2.5 : Comparaison entre les modèles hydrauliques	13
Tableau 3.3.1: Noms et superficies des sous-bassins de la rivière des Outaouais	16
Tableau 5.1: Paramètres des courbes IDF de la station Ste-Agathe	32
Tableau 5.2: Paramètres des courbes IDF de la station Saint-Jérôme	32
Tableau 5.3: Caractéristiques des sous bassins versants du bassin versant de la Rivière-du-Nord	35
Tableau 5.4: Calcul de l'évapotranspiration du climat passé (1874-1978).....	36
Tableau 5.5: Calcul de l'évapotranspiration du climat futur 2050.....	37
Tableau 5.6: Paramètre de la fonte des neiges	38
Tableau 5.7: Paramètres de la méthode de Deficit and constant.....	39
Tableau 5.8: Données Méthode de transfert.....	40
Tableau 5.9: Données du module d'écoulement de base	41
Tableau 5.10 : Paramètres du module du laminage	42
Tableau 5.11: Débits historiques enregistrés à la station 043301	48
Tableau 5.12: Niveaux d'eau simulés (Qmax et Qmoy) pour quelques sections significatives	53
Tableau 5.13 : Analyse de sensibilité du niveau de la rivière	65
Tableau 6.1: Comparaison entre niveaux d'eau moyen et max vs niveau des tabliers des ponts ..	69

LISTE DES FIGURES

Figure 3.1 : Présentation de la rivière des-Prairies	15
Figure 3.2 : Répartition du bassin versant de la rivière des Outaouais	16
Figure 3.3: Schéma représentatif de la méthodologie du travail.....	17
Figure 3.4 : Bassin versant de la Rivière-du-Nord	18
Figure 3.5 : Occupation du sol du bassin versant de la Rivière-du-Nord	19
Figure 3.6 : Réseau hydrographique de la Rivière-du-Nord	20
Figure 3.7: Les sous bassins versants de la Rivière-du-Nord	21
Figure 4.1 : Protocole de travail	23
Figure 4.2 : Méthodologie de l'étude hydraulique élaborée sur la Rivière-des-Prairies.....	30
Figure 5.1 : Hyétogramme de Chicago pour le cas de la station Saint-Jérôme.....	33
Figure 5.2 : Hyétogramme de Chicago pour le cas de la station Sainte-Agathe.....	33
Figure 5.3 : Réseau du drainage du bassin de la Rivière-du-Nord Modules	34
Figure 5.6: Hydrogramme du climat futur du bassin de la Rivière-du-Nord.....	43
Figure 5.4 : Comparaison des hydrogrammes.....	44
Figure 5.5 : Validation du modèle Hec Hms (période allant de 1972-1973).....	45
Figure 5.7 : Comparaison entre l'hydrogramme de la pluie de Chicago vs la pluie triangulaire ..	46
Figure 5.8 : Hydrogrammes de la Rivière-des-Prairies et de ses affluents	49
Figure 5.9: Occupation des sols de la plaine inondable de la Rivière-des-Prairies	51
Figure 5.10 : Calage du modèle (cas des débits de la pluie 22/04/2002).....	54
Figure 5.11 : Étendue de la zone d'inondation Pk =0 à Pk=8.5	55
Figure 5.12 : Étendue de la zone d'inondation Pk =8.5 à Pk=12.5.....	56
Figure 5.13: Étendue de la zone d'inondation Pk =12.5 à Pk=18.5	57
Figure 5.14 : Étendue de la zone d'inondation Pk =18.5 à Pk=21.5	58

Figure 5.15: Étendue de la zone d'inondation $P_k = 21.5$ à $P_k = 22.5$	59
Figure 5.16: Étendue de la zone d'inondation $P_k = 0$ à $P_k = 3$ km	60
Figure 5.17: Étendue de la zone d'inondation $P_k = 3$ à $P_k = 8.5$	61
Figure 5.18: Étendue de la zone d'inondation $P_k = 8.5$ à $P_k = 11.5$ km	62
Figure 5.19: Étendue de la zone d'inondation $P_k = 11.5$ à $P_k = 14.5$ km	63
Figure 5.20: Étendue de la zone d'inondation $P_k = 14.5$ à $P_k = 17.5$	64
Figure 6.1 : Indice de la sensibilité sociale en fonction de l'emplacement sur l'île de Montréal	67
Figure 6.2 : Résultats de l'indice de la sensibilité territoriale	68
Figure 6.3 : Limite de la zone inondable de $P_k = 0$ à $P_k = 6$ pour les cas du Q_{\max} et $Q_{\max} + 20\%$	70

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

CC	Changements Climatiques
CEHQ	Centre d'Expertise Hydrique du Québec
GES	émission du gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
IDF	Intensity–Duration–Frequency
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
MDDEP	Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs
MCG	Modèle de Circulation Générale
MNT	Modèle Numérique de Terrain
Ouranos	Consortium sur la Climatologie Régionale et l'Adaptation aux CC

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

L'augmentation d'émissions de gaz à effet de serre, suite aux activités humaines, a atteint 70% entre 1970 et 2004 (GIEC, 2007). Entre 2002 et 2030, il est prévu que l'émission mondiale du CO₂ augmenterait de 25 à 90% (IPCC, 2000). Ces augmentations ont comme conséquences le réchauffement de la planète terre qui influence à son tour le cycle hydrologique. On observe une augmentation des températures extrêmes, un changement du régime des précipitations, une diminution de l'accumulation des neiges, une accentuation de la fréquence des événements extrêmes et une augmentation de leurs intensités (Ouranos, 2010).

1.1 Problématique

Avec l'accroissement de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes, le risque d'inondation s'accroît. Le souci des autorités responsables (municipalités, ministère de la Sécurité publique (MSP), ministère des Affaires municipales...) de sécuriser les ouvrages hydrauliques s'accroît, vu l'importance du risque et par conséquent les dommages qui peuvent en résulter.

1.2 Objectifs et hypothèse

L'objectif principal de ce travail est l'analyse des impacts engendrés par les changements climatiques (CC) sur la Rivière-des-Prairies, les zones riveraines et les ouvrages hydrauliques qui y sont implantés. Notre projet propose une méthodologie (démarche scientifique) qui permet aux acteurs principaux (ministères, municipalités...) d'analyser le comportement de la rivière dans le contexte de CC.

Les trois objectifs spécifiques qui découlent de l'objectif principal sont :

- Objectif climatique : Caractérisation du climat futur 2041-2070
- Objectif hydrologique : Évaluation des apports en eau, dans le climat futur (2041-2070), des bassins versants en amont de la Rivière-des-Prairies.
- Objectif hydraulique : Simulation des niveaux d'eau de la Rivière-des-Prairies possiblement atteints dans le climat 2041-2070.

- Objectif environnemental : Analyse de l'impact du rehaussement du niveau d'eau de la rivière sur les infrastructures existantes ainsi que sur les berges du cours d'eau.

L'hypothèse de base repose sur l'utilisation de données extrêmes rendant ainsi les résultats de la présente étude conservateurs.

1.3 Plan et contenu du mémoire

Ce mémoire est subdivisé en cinq chapitres. Le premier chapitre constitue l'introduction du projet avec la problématique et les objectifs. Le second chapitre présente la revue de littérature faite sur les études antérieures dont l'objectif est d'étudier des impacts dus aux changements climatiques. Les différents modèles climatiques développés pour la prévision du climat futur ont été aussi décrits. Une approche proposée par Mailhot et al. (2007) est adoptée dans le cadre de cette étude pour la prévision des précipitations du climat futur (2041-2070). Ce chapitre se termine par une description sommaire de l'étude hydrologique et l'étude hydraulique. Le troisième chapitre présente la méthodologie adoptée pour répondre aux objectifs du travail. Le quatrième chapitre constitue l'étude de cas, et comporte deux volets (hydrologique et hydraulique). Le cinquième chapitre est réservé à l'analyse et discussion des résultats. Ce mémoire termine avec les conclusions et les recommandations.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Études antérieures sur les impacts dus aux changements climatiques

Les CC et leurs répercussions sur le climat constituent un réel défi des temps présents. Ils représentent en outre un sujet de recherche pertinent, rendant ainsi le développement des méthodes de prédiction du climat futur très nécessaire. Nombreuses sont les études réalisées sur l'impact des CC sur le régime hydrique des cours d'eau. Une étude sur l'analyse de la sensibilité du régime de l'écoulement de la rivière dans le King County aux États-Unis face aux CC a été complétée. Cette étude a permis de conclure que les CC auront comme influence l'accroissement de la fréquence et de la magnitude des événements extrêmes à l'origine de l'augmentation du débit de la rivière. L'accroissement du débit de la rivière provient essentiellement de l'augmentation de la température à l'origine de la fonte de la neige accumulée (King County, 2010).

Une recherche effectuée par Souvignet *et al.* (2010) a permis de déterminer les caractéristiques du climat futur du bassin Haut-Elqui au Chili en utilisant un modèle climatique régional (SDSM) pour le climat 2000-2059. Cette étude a mis en évidence la haute sensibilité de ce bassin versant aux CC. Elle a permis de conclure que l'augmentation des températures en hiver accélérera la fonte de la glace et de la neige accumulées dans les zones montagneuses, à l'origine de la perturbation du régime hydrique des sous-bassins.

Une analyse de l'impact des CC sur les paramètres hydrologiques de neuf bassins versants (Amazon, Amour, Mackenzie, le Mékong, le Mississippi, Severnaya Dvina, Xi, jaune, Ienisseï) précisément sur les débits a été menée en 2001 (Nijssen *et al.*, 2001).. Quatre MCG ont été utilisés pour la simulation des précipitations et des températures du climat 2025-2045. Une augmentation des températures hivernales est prévue pour les neuf bassins versants en particulier au niveau des bassins versants ayant des altitudes élevées. Ceci perturbera le régime hydrique des cours d'eau, influencé par les apports d'eau en provenance de la fonte des neiges accumulées (surtout au niveau des zones avec des altitudes élevées) à l'origine de l'augmentation du débit de pointe de l'hydrogramme de la crue printanière.

Neff *et al.* (2000) ont analysé la sensibilité de l'écoulement superficiel et souterrain de la région de Mid-Atlantic aux États-Unis face aux CC. Deux scénarios de CC ont été utilisés pour la modélisation des paramètres du climat futur avec un MCG. La simulation des caractéristiques du climat futur a été effectuée pour deux périodes de temps 2025-2034 et 2090-2099. Elle prévoit une augmentation des précipitations et des températures avec une augmentation des débits d'écoulement en particulier en hiver à la suite de la fonte des neiges. L'écoulement fluvial de la région subira des fluctuations et des changements au niveau de son débit de pointe. La recharge des nappes souterraines sera influencée aussi par les CC.

2.3 Étude hydrologique

L'étude hydrologique est une tâche importante qui précède la modélisation hydraulique. Elle permet d'étudier le bassin versant de la rivière et de faire le choix du modèle hydrologique qui permet la transformation des précipitations en débit à l'exutoire du bassin versant. Les résultats de cette étude constituent les données d'entrée du modèle hydraulique indispensable pour la simulation du cours d'eau.

Il est nécessaire de déterminer les caractéristiques du bassin versant caractérisant les apports de la rivière. Ces caractéristiques se classifient en caractéristiques géométriques (superficie, pente...), pédologiques (incluant les types des sols ainsi que les différentes occupations des sols) en plus du temps de concentration et de réponse.

Il existe plusieurs méthodes pour la construction d'un hydrogramme à l'exutoire du bassin versant à partir des précipitations. L'hydrogramme de Desbordes est construit à partir des données des courbes IDF en joignant une ligne horizontale au sommet de la courbe. L'hyétogramme de Chicago est conçu pour l'étude des orages de la ville de Chicago et est basé sur la transformation de l'équation de l'intensité moyenne-durée. La construction des hydrogrammes à partir des précipitations peut se faire aussi à partir de la méthode SCS qui offre trois types de distributions temporelles adimensionnelles (P/Pt) des précipitations de durées de 24h à partir desquelles des hydrogrammes peuvent être construits.

Autres que ces relations, des modèles hydrologiques ont été conçus par les chercheurs pour pouvoir assurer la transformation des pluies en hydrogrammes. Ces modèles se classifient selon

plusieurs critères tels que la représentation du bassin versant, le processus de simulation et sa durée, le type de paramètres et les variables physiques (UQAM, 2013).

- Les modèles conceptuels vs empiriques: dans les modèles conceptuels, on utilise les équations mathématiques pour identifier et décrire tous les processus hydrologiques. Les paramètres physiques qui composent ces modèles ne sont pas mesurables. Par contre, les modèles empiriques sont des modèles dont les paramètres physiques sont mesurables (UQAM, 2013).
- Les modèles probabiliste vs déterministes : un modèle est dit probabiliste si ses paramètres sont aléatoires ou suivent une loi de probabilité. À l’opposé, les modèles déterministes ont des variables et paramètres qui sont définis par une valeur bien déterminée et précise (UQAM, 2013).
- Les modèles globaux vs distribués : les modèles globaux sont des modèles qui considèrent que le bassin versant est composé d’une entité unique homogène qui ne peut pas être subdivisée. Les modèles distribués utilisent une subdivision du bassin versant en sous-bassins ayant chacun des propriétés et caractéristiques homogènes (UQAM, 2013).

La plupart des modèles hydrologiques utilisés sont de types déterministes. Le choix de ces modèles dépend essentiellement de:

- Caractéristiques du bassin à savoir urbanisé ou non urbain,
- Mise en œuvre des différents processus hydrologiques (infiltration, fonte de la neige...),
- But de l’étude ainsi que de la disponibilité des données fiables,
- La fiabilité, le coût monétaire...

Une comparaison faite sur quelques modèles hydrologiques est illustrée dans le tableau 2.3.

Tableau 2.1 : Comparaison entre modèles globaux et modèles distribués

Nom du modèle	GR2M	Hec Hms	SWMM	Mike 11
Type modèle	Global	Distribué	Distribué	Distribué
Cout	Gratuit	Gratuit	Gratuit	Licence commerciale
Expertise	Faible	Bonne	Bonne	Bonne
Documentation	Bonne	Bonne	Bonne	Bonne
Modélisation des processus	Pas tous les processus du bassin rural	Toutes les composantes du bassin rural	Toutes les composantes du bassin urbain	Toutes les composantes du bassin urbain ou rural
Degré de complexité	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen

2.4 Le climat futur

2.4.1 Introduction

Le Réseau Canadien des Scénarios de Changements Climatiques définit les CC comme étant *''toute variation survenant au cours d'une période définie (par rapport à une période de référence) correspondant à une variation statistique significative du climat moyen ou de ses variables, et persistant pendant une longue période (p. ex. pendant plusieurs décennies ou plus) ''* (RCSCC, 2013).

Environnement Canada définit les CC comme étant *« des changements dans les conditions météorologiques à long terme. Ces modifications proviennent des phénomènes naturels et des activités anthropiques à l' origine de l'émission des gaz à effet de serre qui emprisonnent la chaleur et la renvoient vers la surface de la terre »*. (Environnement Canada, 2013)

Les CC peuvent être dus aux phénomènes naturels (c'est-à-dire des processus externes ou internes au système climatique), et/ou à des forçages anthropiques (ex. augmentation des gaz à effet de serre).

2.4.2 La génération du climat futur : Les Modèles climatiques

La variation continue du climat a mené les chercheurs à élaborer des modèles climatiques qui permettent de prévoir l'évolution du climat futur en se basant sur des scénarios de CC. Ces modèles ont évolué dans le temps, allant de modèles simples aux modèles de Circulation Générale et enfin, aux modèles les plus développés en termes de résolution spatiale à savoir les modèles Climatiques Régionaux. Le GIEC définit, dans son deuxième rapport, un modèle climatique comme étant l'outil de modélisation des impacts de l'activité anthropique sur le changement du climat (GIEC, 2007).

2.4.2.1 Les modèles atmosphère-océan

Ils estiment la température à l'échelle du globe ainsi que le niveau de la mer suite au réchauffement planétaire. Ces modèles sont conçus afin de représenter le système atmosphère-océan. Les simulateurs de ces modèles simples calculent les prévisions de la température à la surface de la terre à l'échelle du globe, en utilisant l'équation d'équilibre énergétique (IPCC, 2007).

2.4.2.2 Les modèles de Circulation Général (MCG)

Il s'agit des modèles permettant la résolution des équations de la mécanique et de la thermodynamique (variable dans le temps et dans l'espace) (MDCR, 2013). Ces modèles sont composés d'un maillage de résolution qui s'étend sur 300 km à l'horizontal et sur 1 km à la vertical. Ils permettent de simuler l'atmosphère et l'océan. Il existe en fait deux principales classes des MCG, à savoir les Modèles de Circulation Générale atmosphère et les Modèles couplés de Circulation Générale atmosphère-océan (Environnement Canada, 2013).

2.4.2.3 Méthodes de mise à l'échelle (MRC)

Les modèles régionaux ont été conçus avec des grilles à échelles fines (bonne résolution) pour une meilleure simulation du climat futur. Le Modèle Régional Climatique simule les processus physiques à long terme sur des échelles fines. Ces modèles sont caractérisés par une haute résolution spatiale, et les simulations des paramètres physiques du climat sont élaborées sur des grilles ayant 45 km à la verticale (Environnement Canada, 2013).

2.4.2.4 Méthode des courbes IDF (approche de Mailhot)

L'objectif des modèles climatiques est la prévision du climat futur avec une bonne résolution spatiale. Toutefois, les modèles climatiques exigent de nombreuses données d'entrée (à savoir les précipitations, les températures, l'humidité, l'évapotranspiration, etc.). Ceci constitue déjà une contrainte, étant donné que l'enregistrement de ces paramètres n'est pas réalisé d'une manière continue. Les modèles climatiques exigent aussi de nombreuses données de précipitations horaires qui ne sont pas toujours publiques et qui nécessitent un traitement préalable avant leur utilisation. En plus du temps de calcul et de résolution qui est important.

Par ailleurs, une approche dérivée de l'utilisation des modèles climatiques pour le Sud du Québec a été développée par Mailhot et al. (2007). Elle consiste à déterminer la façon avec laquelle les événements extrêmes seront modifiés dans le climat futur 2041-2070. En effet, les précipitations maximales annuelles de mai à octobre du climat de contrôle ont été simulées avec le Modèle Régional Climatique (MRC). La période considérée varie de 1961 à 1990 pour différentes durées (2h, 6h, 12h et 24 h) et périodes de retour (2, 10, 20, 100 ans). Ces données proviennent de 51 stations situées au Sud du Québec. Elles ont été extraites des courbes IDF de la région du Sud du Québec, construites pour la période variant de 1961-1990. Les résultats des simulations ont été comparés avec les données observées. L'analyse des résultats de la calibration du MRC a permis de conclure qu'il existe une consistance entre les valeurs de précipitation qui ont été observées et celles simulées par le modèle pour la période (1961-1990). Une fois que le modèle MRC a été calibré, la simulation des précipitations extrêmes du climat futur (2041-2070) a été élaborée. Des analyses statistiques effectuées sur les résultats (intensités des précipitations) de la simulation des précipitations du climat futur (2041-2070) et celles du climat de référence ont été élaborées par les chercheurs. D'après eux, cette intensité augmentera de 1.5 à 20.6 % par rapport à celle des

précipitations du climat de référence. Ce pourcentage dépend de la durée ainsi que de la période de retour de l'évènement. Le tableau 2.2 donne les pourcentages de majoration des précipitations du climat de référence, évalués en fonction de la durée et de la période de retour des pluies (Mailhot et *al.*, 2007). Dans le cadre de cette étude, afin d'évaluer les précipitations du climat futur (2041-2070) du bassin versant de la rivière en question. L'hyétogramme du climat de référence a été construit à partir des données des IDF. L'hyétogramme des précipitations du climat futur pour le même évènement pluvieux est obtenu par majoration, en utilisant le pourcentage convenable donné dans le tableau 2.2.

Tableau 2.2: Pourcentage de majoration des pluies du climat de référence (1961-1990) en fonction de la durée et de la période de retour de la pluie

Période de retour (année)	Durée (h)			
	2	6	12	24
2	20,6 %	13,9 %	11 %	10,6 %
5	18,1 %	14,5 %	10 %	8,8 %
10	15,8 %	13,1 %	8,2 %	6,9 %
25	13 %	10,1 %	5,1 %	3,9 %
50	11,2 %	7,3 %	2,5%	1,5 %

2.4.2.5 Scénarios de changements climatiques

Ouranos (2013a) définit les scénarios climatiques comme étant « la planification et l'adaptation aux changements climatiques en utilisant de l'information de haute qualité sur l'intensité et le taux des changements projetés ».

Quatre principales familles de scénarios de GES peuvent être distinguées : A1, A2, B1 et B2. Chaque famille prévoit l'évolution du climat futur en fonction des divers paramètres évolutifs tels que la croissance démographique, le développement de l'économie et de la technologie, le changement de l'occupation des sols, etc.

2.4.3 Impacts des changements climatiques sur le Québec et le Canada

Le climat québécois actuel est caractérisé par une diversité climatique due à l'étendue du territoire. Il est caractérisé à la fois par des climats : tempéré, polaire et subpolaire. Le climat actuel de la région du Québec est caractérisé par une température moyenne estivale qui varie de 20°C à 3°C allant du Sud au Nord tandis qu'en hiver elle atteint une valeur allant de -8°C à -25°C (Ouranos, 2010). La région du sud du Québec a connu une augmentation de la température journalière moyenne de 1960 à 2005 de 0,2° C à 0,4°C par décennie (Yagouti et al, 2008).

De même, des augmentations au niveau du nombre de jours des précipitations à faibles intensités ont été prévues (Vincent et Mekis, 2006). Le Sud du Québec a connu une diminution des précipitations solides, alors que ces dernières ont augmenté dans le Nord (Ouranos, 2010). Le climat futur de la région du Québec est caractérisé par un réchauffement plus marqué en hiver qu'en été (Solomon et al, 2007). En hiver 2050, dans la région du Sud du Québec, une augmentation de la température en hiver de 2,5°C à 3,8°C a été estimée. De même, dans le Nord du Québec, une augmentation de la température dans une plage de 4.5°C à 6.5°C a été prévue (Ouranos, 2010).

Des augmentations de précipitations en saison hivernale, de l'ordre de 16,8 à 29,4 % au Nord et de 8,6 à 18,1 % au Sud ont été estimées (Ouranos, 2010) à l'origine de l'accumulation de la neige au sol dans la région du Nord. Par contre, les précipitations vont diminuer au centre et au Sud du Québec. En été 2050, une augmentation des précipitations, dans une plage allant de 3 à 12.2 %, seulement au Nord a été marquée (Ouranos, 2010).

Les changements saisonniers de températures et de précipitations, prévus pour le Sud du Québec sont illustrés au tableau 2.2. Les CC auront un impact sur le régime des précipitations, leurs intensités et la fréquence des événements météorologiques extrêmes (GIEC, 2007). En effet, selon le GIEC, la fréquence des épisodes de fortes précipitations verra des augmentations accompagnées d'un accroissement de leurs intensités. Les changements que subiront les précipitations (distribution et intensité) au cours du prochain siècle auront des impacts sur le cycle hydrologique de la région (Lambert, 2011). Ces modifications pourront engendrer une diminution de la capacité d'infiltration des sols à l'origine d'un accroissement du ruissellement.

Les CC ont comme impacts : l'augmentation de la fréquence ainsi que l'intensité des événements extrêmes (inondations, ouragans, tempêtes, etc.) à l'origine des dégâts importants. En novembre

et décembre 2006, la Colombie-Britannique a subi un vent et une pluie si violents que des milliers d'arbres, des panneaux d'électricité ont été renversés accompagnés de glissements de terrain (Statistique Canada, 2013). Le Canada a enregistré des températures plus chaudes que la normale (+2,3°C par rapport aux températures normales) pour les 12 mois allant de décembre 2005 à novembre 2006, ce qui correspond à la dixième année durant laquelle des températures supérieures à la normale sont survenues depuis 1998 (Environnement Canada, 2013). L'augmentation de la température et la diminution des précipitations (sous forme de neige) au cours de la période hivernale sont à l'origine de la réduction de la taille des glaciers, sources d'approvisionnement en eau douce au Canada. À titre d'exemple, les masses de glaces accumulées au niveau du bassin de la rivière Saskatchewan Nord ont été réduites de 22% de 1975 à 1988 alors que 36% des masses de glaces du bassin de la rivière Saskatchewan Sud ont été diminuées pour la même période (Statistique Canada, 2013).

Tableau 2.3: Changements saisonniers des températures et précipitations pour la région du Sud du Québec (Ouranos, 2010)

<i>Saison</i>		Changement à l'Horizon 2020	Changement à l'Horizon 2050	Changement à l'Horizon 2080
<i>Hiver</i>	Températures	1,3 à 2,3°C	2,5 à 3,8°C	3,6 à 5,7°C
	Précipitation	3,7 à 11,1%	8,6 à 18,1 %	14,5 à 27,6 %
<i>Printemps</i>	Températures	1,0 à 1,7°C	1,9 à 3,3°C	2,7 à 4,3°C
	Précipitations	2,0 à 8,6 %	4,4 à 13,1%	8,9 à 22,2 %
<i>Été</i>	Températures	1,1 à 1,7°C	1,9 à 3,0°C	2,6 à 4,4°C

Tableau 2.4 : Changements saisonniers des températures et précipitations pour la région du Sud du Québec (Ouranos, 2010) (suite)

	Précipitations	-1,5 à 4,4 %	-1,8 à 5,4%	-4,9 à 6,0%
<i>Automne</i>	Températures	1,2 à 1,9°C	2,0 à 3,1°C	2,7 à 4,5°C
	Précipitations	-2,7 à 3,6 %	-0,7 à 7,7%	1,4 à 12,8%
	Précipitations	-1,5 à 4,4 %	-1,8 à 5,4%	-4,9 à 6,0%

2.5 Étude hydraulique

2.5.1 Introduction

La modélisation d'une rivière consiste tout d'abord à construire le Modèle Numérique de Terrain (MNT) de la rivière qui inclut les données de topographie et les coefficients de rugosité pour les différentes composantes du lit de la rivière. Une fois que le MNT a été construit, les simulations peuvent être exécutées une fois que les conditions aux limites ont été définies.

En effet, il existe plusieurs modèles hydrauliques conçus pour les simulations. Pour la modélisation des crues, les modèles unidimensionnels et bidimensionnels sont les plus couramment utilisés. Des modèles hydrauliques tridimensionnels existent mais ils sont moins utilisés. Le choix du modèle dépend de plusieurs critères essentiellement; l'objectif du travail, le degré de précision recherché, la nature des données d'entrée demandées par le modèle, son degré de complexité, son temps de calcul ainsi que son coût monétaire, etc. Une comparaison faite sur quelques modèles hydrauliques est représentée dans le tableau 2.4.

Tableau 2.5 : Comparaison entre les modèles hydrauliques

Nom du modèle	Hec Ras	Modeleur Hydrosim	Mike 21	River 2D
Type de modélisation	1D	2D	2D	2D
Cout	Gratuit	Payant	Payant	Gratuit
Documentation	Bien documenté	Bien documenté	Moyennement documenté	Bien documenté
Temps de calcul	Court	Long	Long	Très long

2.5.2 Historique de la modélisation hydraulique de la Rivière-des-Prairies

Le Service de l'hydrométrie du ministère des Richesses naturelles du Québec a complété une étude en 1978 sur la Rivière-des-Prairies et qui a été mise à jour en 1983 (Boucher, 1978), qui avait comme objectif la détermination des côtes de crue de récurrence 20 ans et 100 ans. Les niveaux d'eau ont été calculés en modélisation unidimensionnelle de la rivière.

Une mise à jour des études réalisées en 1978 et 1983 a été effectuée par la Direction du domaine hydrique du ministère de l'Environnement en 1993. Les écoulements ont été simulés par le modèle Hec-2. Cette étude a cartographié les limites des zones inondables uniquement pour la ville de Laval (Boucher et Picard, 1993).

En avril 2005, le CEHQ a publié son rapport révisant les côtes de crue de la Rivière-des-Prairies pour les récurrences 2 ans, 20 ans et 100 ans. Les débits de récurrence ont été évalués grâce à une analyse statistique des débits maximums annuels à l'aide du logiciel HYFRAN. La modélisation hydraulique a été effectuée en utilisant deux modèles hydrauliques : Hec Ras et Modeleur Hydrosim. Les résultats des simulations ont permis de délimiter les zones inondables pour les différentes crues de récurrences 2 ans, 20 ans et 100 ans (CEHQ, 2005).

CHAPITRE 3 PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

3.1 Introduction

La simulation d'un cours d'eau nécessite la connaissance préalable de l'hydrologie du bassin versant qui y contribue avec ses apports naturels. Ces apports seront pris en considération au moment de la modélisation hydraulique du cours d'eau. Comme mentionné dans le chapitre 1, l'objectif de ce mémoire est la simulation du comportement de la Rivière-des-Prairies dans le contexte des changements climatiques. Afin d'accomplir cette tâche, il fallait étudier les apports du bassin versant en amont de la rivière à savoir les apports du bassin versant de la Rivière-des-Outaouais. De ce fait, ce chapitre est composé de deux volets à savoir le volet hydrologique et le volet hydraulique.

3.2 Présentation de la zone d'étude et caractéristiques du bassin versant

La Rivière-des-Prairies est située dans le sud-est du Québec, et sépare l'île de Montréal de l'île Laval. Cette rivière prend source au lac de Deux-Montagnes pour se jeter dans le fleuve St-Laurent (figure 3.1). Le bassin versant de la Rivière-des-Outaouais occupe une superficie de 146 334 km². Ce bassin s'étend de la province de l'Ontario jusqu'à la province du Québec, 92 203 km² de la superficie totale se trouve au Québec et le reste en Ontario (MDDEFP, 2013). La Rivière-des-Outaouais est la deuxième plus importante rivière du côté de l'Est du Canada ayant une longueur de 1 271 km. Le bassin versant des Outaouais est composé de dix-neuf sous bassins dont les principaux sont Gatineau, du Lièvre, Kipawa, le Nord et Rouge qui sont situés du côté du Québec (figure 3.2 et table 3.1). La rivière des Outaouais (incluant la rivière du Nord) qui coule en partie dans le lac des Deux-Montagnes évacue ses apports dans cinq exutoires, entre autres la Rivière-des-Prairies et la Rivière-des-Mille-Îles. En effet, les eaux du Lac-des-Deux-Montagnes suivront cinq chenaux à savoir : la Rivière-des-Prairies à travers trois branches, la Rivière-des-Mille-Îles, le fleuve St-Laurent et le canal de Sainte-Anne. La répartition des débits à travers ces chenaux a été l'objet d'une étude réalisée par le Centre d'Expertise Hydrique du Québec (CEHQ) en 2005 sur Rivière-des-Mille-Îles. En effet, 40% du débit total du bassin de la Rivière des Outaouais est évacué au niveau de la Rivière-des-Prairies, 48 % du débit s'écoule au niveau du chenal Vaudreuil et Sainte-Anne. Alors que seulement 12 % sont évacués par de la Rivière-des-Mille-Îles.

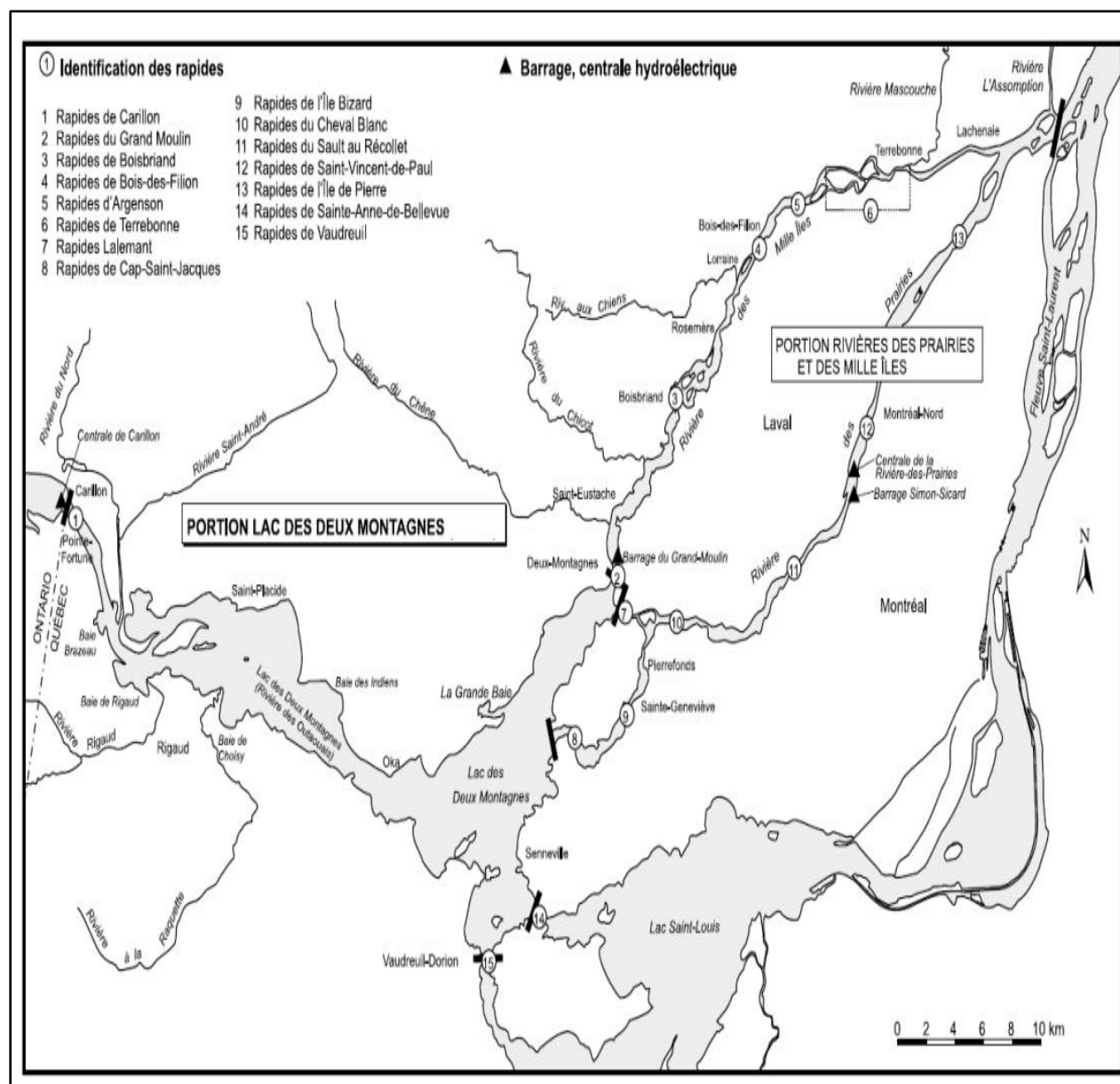


Figure 3.1 : Présentation de la rivière des-Prairies (Robitaille, 1999)

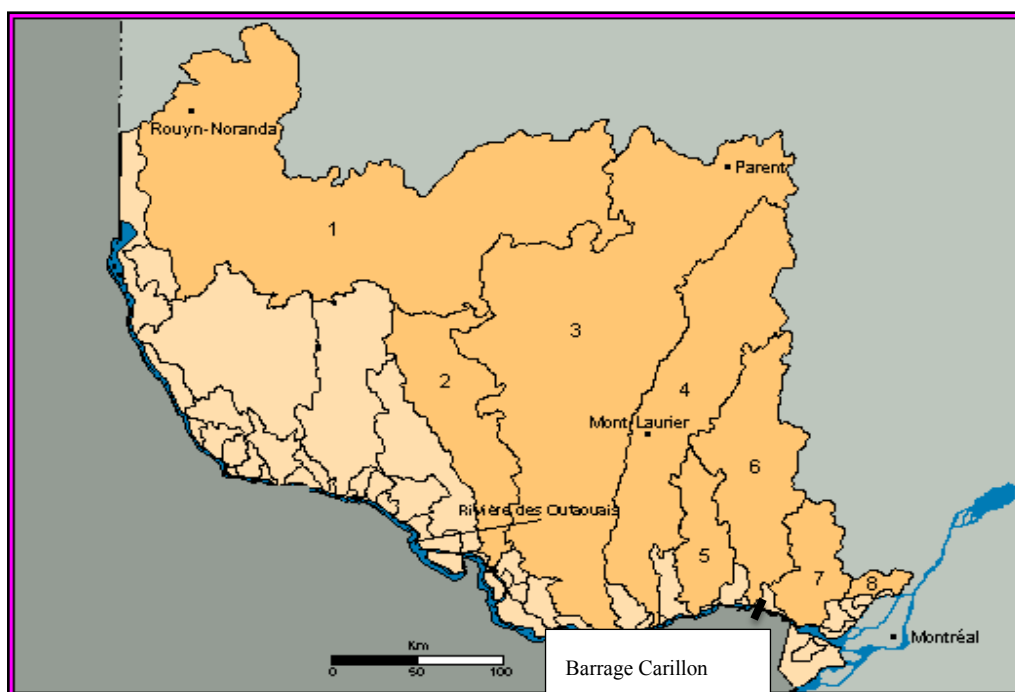


Figure 3.2 : Répartition du bassin versant de la rivière des Outaouais (MDDEFP, 2013).

Tableau 3.3.1: Noms et superficies des sous-bassins de la rivière des Outaouais

Sous-bassin versant	Superficie km ²
3. Gatineau	23 724
4. Du Lièvre	600
5. De la Petite Nation	2 250
6. Du Rouge	5 543
7. Du Nord	2200

En effet, la rivière à l'étude a un grand bassin versant. La partie la plus grande est située en amont du barrage de Carillon. Le site d'Environnement Canada (Environnement Canada, 2013) fournit les données de débits journaliers enregistrés au niveau du barrage Carillon pour la période allant de 1962 à 1994. L'autre partie de données hydrologiques est constituée des apports du bassin en aval du barrage Carillon où la rivière du Nord représente 1,5% de la superficie (figure 3.3). Les apports déversés par le barrage sont enregistrés quotidiennement et un facteur de majoration (à déterminer) utilisé pour tenter de modéliser les apports naturels sous le climat 2041-2070. Pour

le bassin versant en aval, l'approche consiste à modéliser les débits de la rivière du Nord pour des épisodes de pluie représentatifs du même climat. Il est à noter que le territoire en aval du barrage du Carillon et du bassin versant de la Rivière-du-Nord n'a pas été pris en compte dans cette étude (essentiellement la baie de Rigaud et Vaudreuil). La superficie de ce territoire s'étend sur une étendue d'environ égale à 630 Km², qui est minimale comparée à l'étendue du bassin de la Rivière-des-Outaouais.

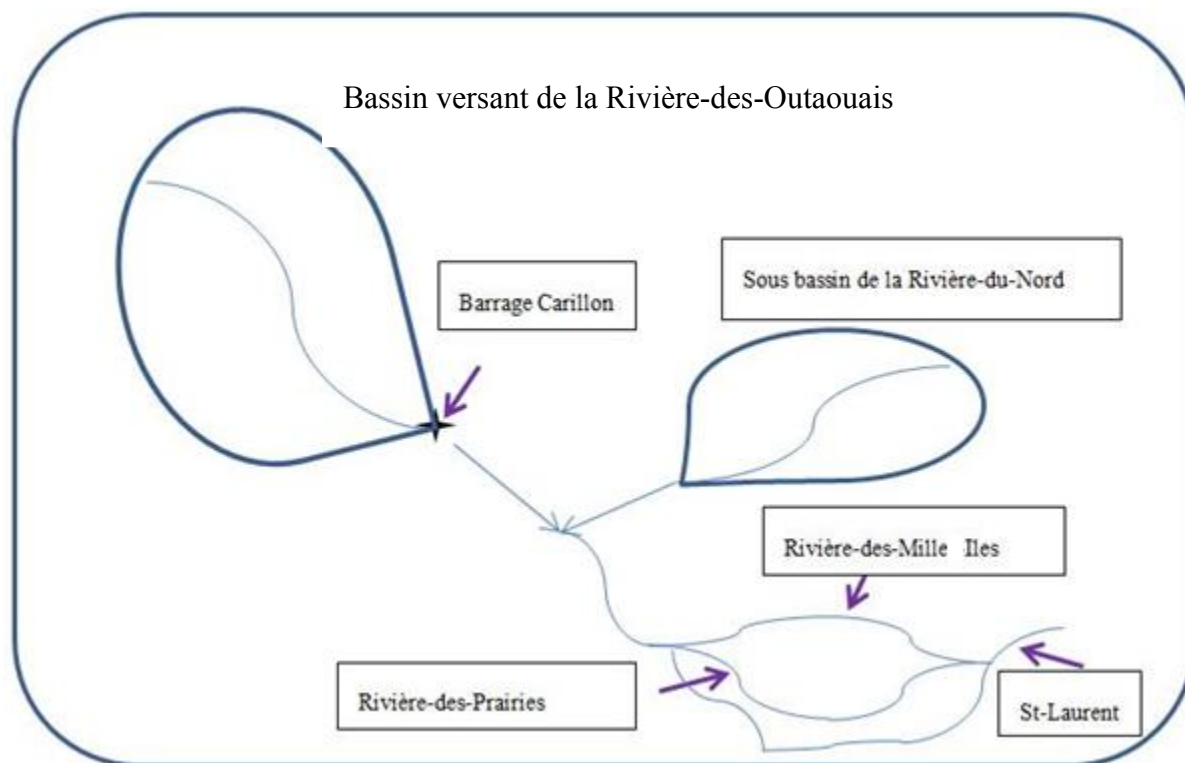


Figure 3.3: Schéma représentatif de la méthodologie du travail

3.3 Hydrologie du bassin versant de la Rivière-du-Nord

3.2.1 Présentation du bassin versant de la Rivière-du-Nord

Le bassin versant de la Rivière-du-Nord s'étale sur une superficie de 2200 km² (figure 3.4). Avec une pente moyenne de 3,1 m/ km. La rivière du Nord s'écoule de l'amont vers l'aval en traversant les villes et les municipalités suivantes : Sainte-Agathe-des-Monts, Sainte-Adèle, Saint-Sauveur, Saint-Jérôme, Mirabel, Lachute et Saint-André-d'Argenteuil



Figure 3.4 : Bassin versant de la Rivière-du-Nord (Abrinord, 2013)

En effet, 73% de la superficie totale du territoire est occupée par les forêts et qui occupe plus de 1600 km² de la superficie totale du bassin, 13% de cette superficie est transformée en terrain agricole alors que le reste du bassin est occupé par les zones urbaines et les zones aquatiques et humides qui couvre 2% de la superficie du bassin versant (figure 3.5) (Abrinord, 2008).

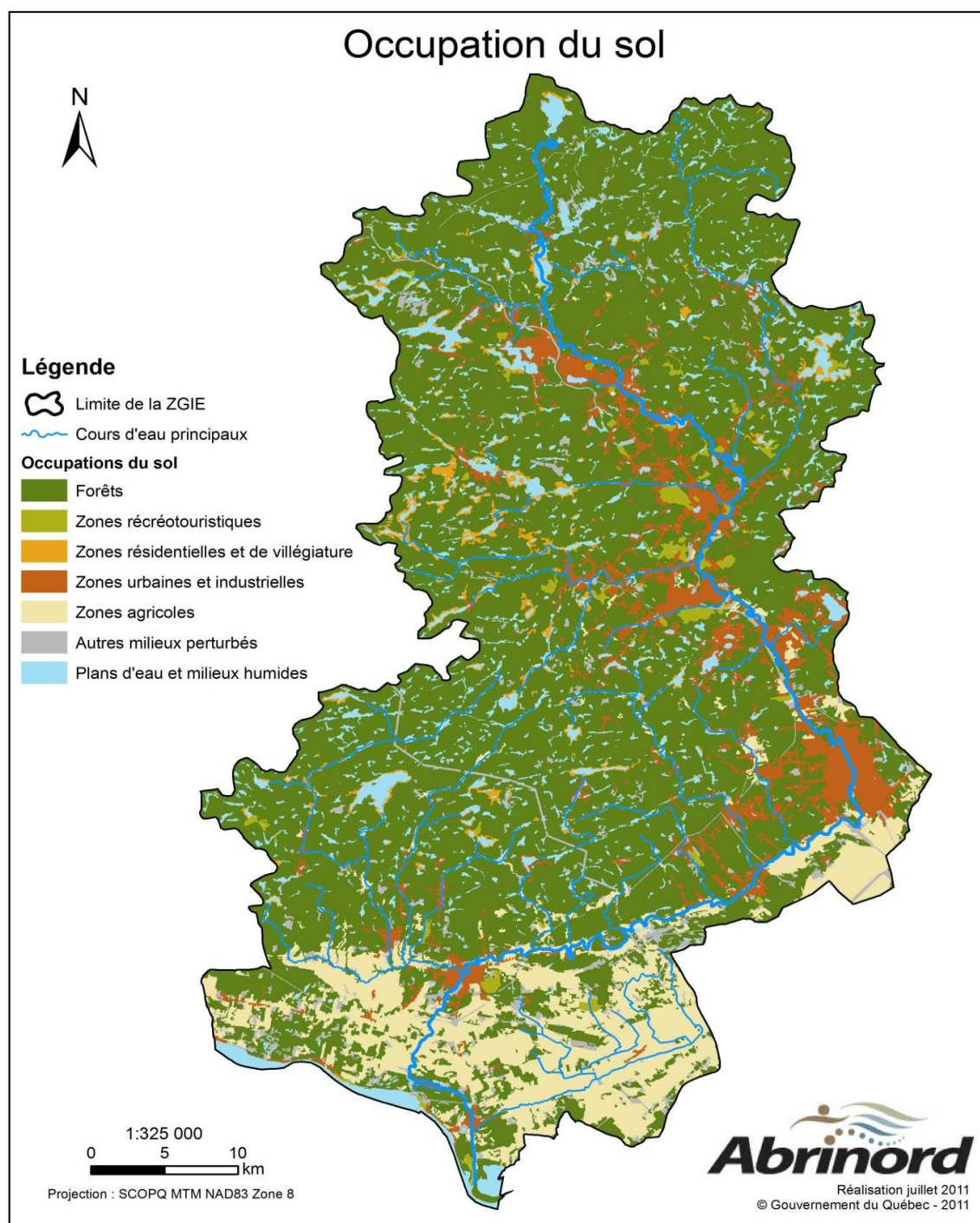


Figure 3.5 : Occupation du sol du bassin versant de la Rivière-du-Nord (Abrinord, 2013)

Le réseau hydrographique de la rivière est composé par de nombreux affluents (figure 3.6). Au niveau de ce bassin versant, il existe divers petits barrages qui ont été implantés au niveau des exutoires des lacs. Cependant, ils n'ont pas d'influence sur le régime hydrographique du bassin versant. C'est pour cette raison qu'ils n'ont pas été pris en compte dans la présente étude.

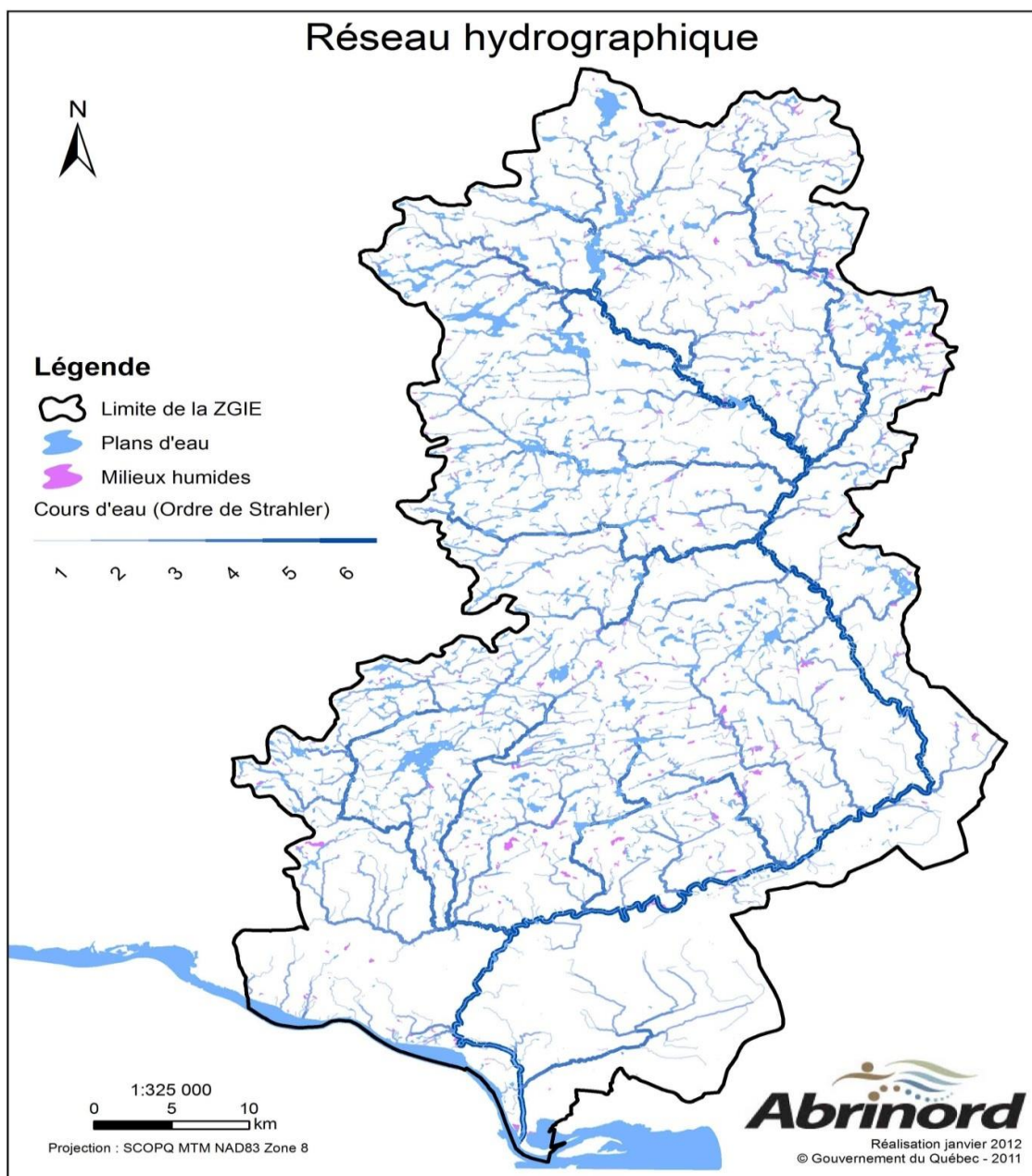


Figure 3.6 : Réseau hydrographique de la Rivière-du-Nord (Abrinord, 2013)

On compte dix sous bassins versants, le pourcentage d'occupation de chacun des sous bassins sont illustrés à la figure 3.7.

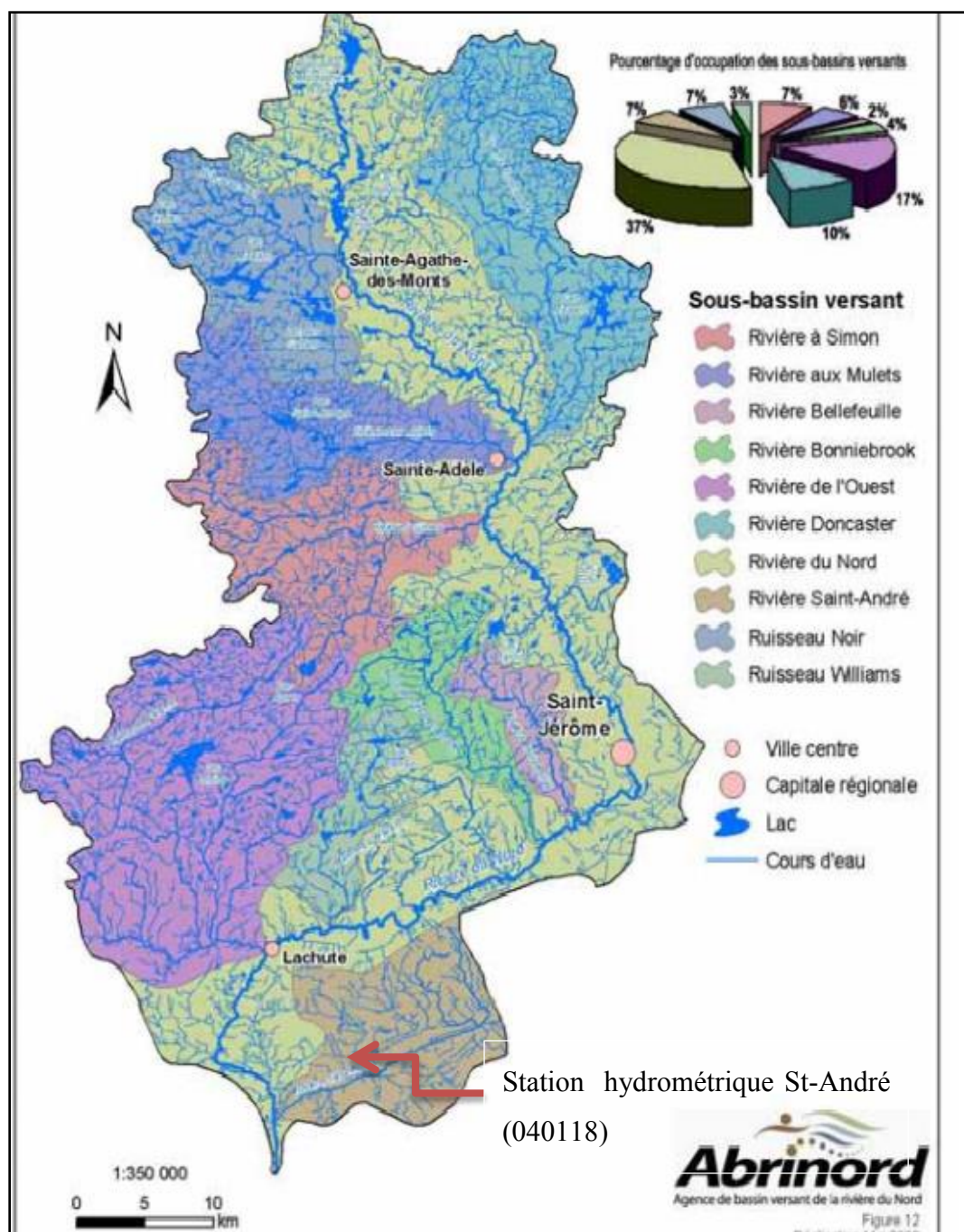


Figure 3.7: Les sous bassins versants de la Rivière-du-Nord (Abrinord, 2013)

Le bassin versant de la Rivière-du-Nord est composé de deux régions physiographiques à savoir le plateau laurentien étendu sur la partie amont et qui domine la région des basses terres qui est

en aval. Le plateau est composé de relief allant de vallonné, au sud, à montagneux au nord. Cette partie du bassin est dominé par les dépôts de till glaciaires, les assises précambriennes sous-jacentes constituent la majeure partie de la topographie (Lajoie, 1960).

Les basses terres du Saint Laurent sont composées d'une couche de sédiments d'origine marins sur lequel repose une plaine composée de matériaux fluviaux-glaciaires, avec un fond argileux profond et creusé qui a été soumis à l'action de l'érosion (par le courant d'eau) (Lajoie, 1960).

3.2.2 Présentation de l'archipel de Montréal

L'île de Montréal est délimitée des deux côtés par la Rivière-des-Prairies et le fleuve Saint-Laurent. La région de Montréal s'étend sur un territoire occupant environ 500 km². Seulement 13% de la superficie est occupé par les forêts, 7.5% par l'agriculture et le reste du territoire est urbanisé. Il s'agit d'un archipel composé de nombreux îles dont les principales sont : l'île de Montréal, l'île Bizard, l'île des Sœurs, l'île Dorval, l'île Notre-Dame et l'île Sainte-Hélène.

On compte cinq barrage installés au niveau de la région de Montréal en outre la centrale hydroélectrique, propriété d'Hydro-Québec est exploitée seulement pour la production de l'électricité et qui est implantée au niveau de la Rivière-des-Prairies.

Du fait de la complexité de la zone d'étude, des hypothèses de travail, justifiées, ont été considérées afin de pouvoir simplifier le travail.

CHAPITRE 4 MÉTHODOLOGIE

4.1 Introduction

L'étude de l'impact des changements climatiques sur le comportement des rivières nécessite la connaissance des caractéristiques du climat futur déterminées à la suite d'une modélisation climatique. Une connaissance préalable des caractéristiques physiques et hydrologiques du bassin versant est importante afin de pouvoir quantifier la contribution en eau du bassin versant en amont de la rivière (étude hydrologique). L'étude du rehaussement du niveau de la rivière nécessite la manipulation d'un modèle hydraulique fiable. La méthodologie globale du travail se résume dans l'organigramme ci-dessous (figure 4.1).

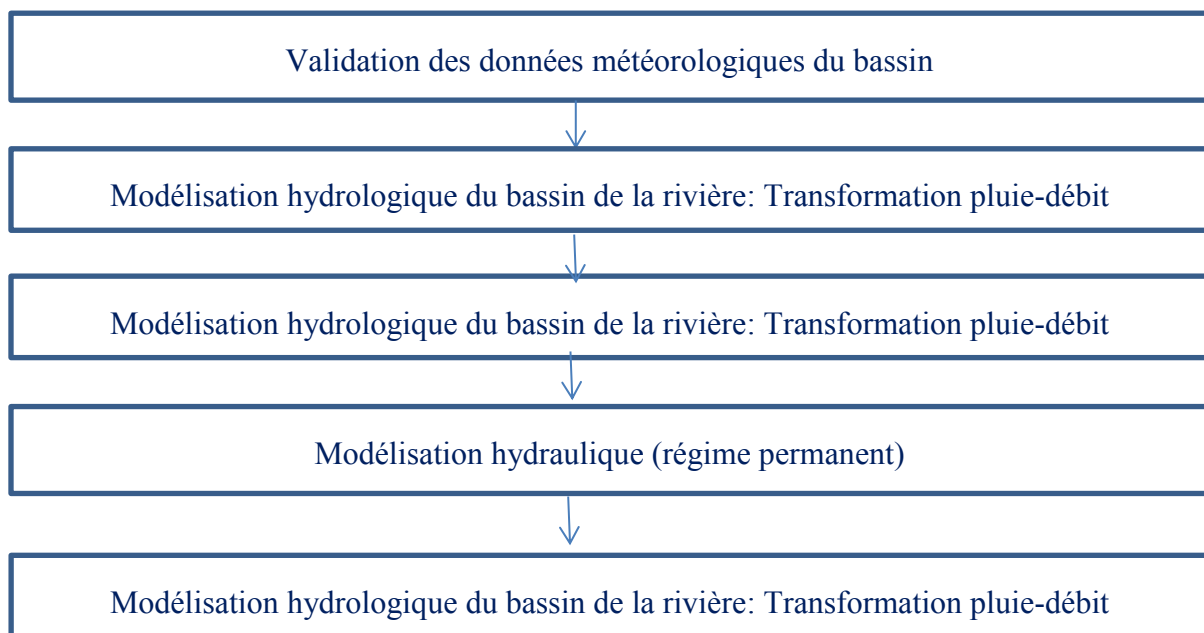


Figure 4.1 : Protocole de travail

4.2 Modélisation du climat futur

Comme présenté dans le chapitre 1, la modélisation du climat futur moyennant les modèles climatiques, exige de nombreuses données d'entrée dont l'enregistrement ne se fait pas de manière continue. Dans cette étude, les courbes d'intensité-durée-fréquence produites par

Mailhot et al. (2007) tiennent lieu de modèle du climat pour la période considérée. Ce que je propose comme argumentaire est d'exploiter les résultats de cette étude de Mailhot-

4.3 Étude hydrologique

La délimitation du bassin de la Rivière-du-Nord a été effectuée à l'aide d'Hec Géo-Hms qui est une extension pour Arc Gis. En effet, le DEM du bassin de la Rivière-du-Nord a été téléchargé du site Géo base (Géo base, 2013) et a été importé dans l'environnement Arc Gis. Le DEM combiné avec les informations sur le réseau hydrographique du bassin ont subi divers processus afin de pouvoir définir le réseau du drainage de la Rivière-du-Nord et par conséquent définir les sous-bassins. Les diverses étapes émanant à la délimitation des sous bassins versants sont essentiellement (USACE, 2000a)

- La définition de l'exutoire du bassin,
- la définition de la direction d'écoulement,
- La segmentation du cours d'eau principal en cours d'eau secondaire raccordés au niveau des jonctions,
- Délimitation préliminaire des sous bassins versants. Le bassin versant de la Rivière-du-Nord a été subdivisé en plusieurs sous bassins. Cette répartition n'était pas finale. En se référant aux cartes fournies sur la subdivision du bassin de la Rivière-du-Nord. Les sous bassins versants ayant une jonction commune et des caractéristiques physiques homogènes ont subi une fusion.

Les caractéristiques des sous-bassins (ex. longueur et pente de la rivière, pente du bassin, etc.) ont été exportés depuis le modèle de la rivière traité avec Hec Géo Hms vers un fichier (.bassin) contenant toutes les données à exploiter lors de l'étude hydrologique faite avec le modèle Hec Hms

4.3.1 Caractéristiques du bassin versant

Nombreuses sont les caractéristiques relatives au bassin versant. Parmi les caractéristiques qu'il fallait définir, le temps de concentration et de réponse sont essentiels considérant les modèles pluie-ruissellement adoptés pour l'étude. En effet, il existe plusieurs formules qui permettent l'évaluation des temps de concentration et de réponse des bassins versants. Dans le cadre de ce

projet, la formule de Watt et Chow a été appliquée pour le calcul de ces paramètres, étant donné que les sous bassins versants de la Rivière-du Nord satisfont aux conditions d'application (sous bassins versants localisés au Canada avec des superficies variant entre 0.01 et 5840 km²) (Ancil, et al, 2005).

La formule s'écrit :

$$t_c = (1/0.6) * t_l \quad [3.1]$$

$$\text{Où} \quad t_l = 0.000326 L^{0.79} s^{-0.395} \quad [3.2]$$

t_l : temps de réponse en heures

t_c : temps de concentration en heures

s : pente adimensionnelle

L : longueur du cours d'eau en mètres

4.3.2 Données météorologiques

Les pluies peuvent être soit réelles, dont les intensités exceptionnelles sont rares à enregistrer (absence des enregistrements des pluies du climat futur) ou des pluies synthétiques qui sont fréquemment utilisées afin de représenter l'évènement pluvieux. Pour le cas des pluies synthétiques, il existe plusieurs manières de les représenter tel que : l'hyétogramme constant ou rectangulaire, l'hyétogramme triangulaire, l'hyétogramme de Chicago...

En effet, l'hyétogramme triangulaire est caractérisé par un pic étalé par rapport à l'hyétogramme de Chicago et il est couramment utilisé dans des projets de construction des bassins de rétention (Yen et Chow, 1980). D'où le choix de l'hyétogramme de Chicago comme pluie synthétique de la zone du projet, étant donné qu'il est fréquemment utilisé dans la pratique (ASCE, 1992) et plus précisément au Canada.

La formule de Chicago, utilisée pour la région de Montréal (la région d'étude), est donnée par l'équation 3.3:

$$i = a \left[\frac{(1-c)\left(\frac{t_p-t}{r}\right)+b}{\left(\frac{t_p-t}{r}+b\right)^{c+1}} \right] \text{ pour } t \leq t_p \quad i = a \left[\frac{(1-c)\left(\frac{t_b}{1-r}\right)+b}{\left(\frac{1-t_p}{1-r}+b\right)^{c+1}} \right] \text{ pour } t \geq t_p \quad [3.3]$$

Où; t_p est le temps du pic; a , b et c les paramètres de la courbe IDF; $t_b = t - t_p$; r le paramètre indiquant le temps du pic et qui dépend la région, avec $r = \frac{t_{pic}}{\text{durée de pluie}}$

Deux stations météorologiques localisées au niveau du bassin versant de la Rivière-du-Nord fournissent les données de précipitations: les stations Sainte Agathe et Saint Jérôme. En plus des précipitations, trois stations météorologiques fournissent les données de températures à savoir la station Sainte Agathe, Saint Jérôme et Lachute. Et enfin, une station de mesure de débits au niveau du sous bassin Saint André qui fournit les débits observés (040118), utilisés pour la calibration et la validation du modèle.

Pour la modélisation hydrologique du bassin versant dans le cas du climat futur, l'hyétogramme de Chicago du climat futur à l'horizon 2050 a été construit (par application du pourcentage de majoration préconisé par Mailhot : 1.5 %) étant donné qu'il est fréquemment utilisé dans la pratique et surtout au Canada.

Pour élaborer les simulations, il fallait positionner l'hyétogramme de Chicago dans une série chronologique. L'hypothèse considérée consiste à supposer qu'il s'agit de l'hyétogramme du mois d'avril 2050, étant donné que le mois d'avril est un mois de crues (en vérifiant les précipitations et de débits enregistrés au cours de la période allant de 1971-1999 publiées sur le site d'Environnement Canada (2012), on s'est rendu compte que le mois d'avril est un mois de crues). À l'hyétogramme, $T=f(t)$ du mois d'avril 2050 a été définie. Elle a été déterminée en majorant les températures du climat passé de $+3^{\circ}\text{C}$ (Ouranos, 2010).

4.3.3 Transformation des pluies – débits

4.3.3.1 Présentation du modèle choisi

Dans le cadre de ce projet, le modèle *Hec Hms*, un modèle déterministe et distribué, a été choisi pour la modélisation hydrologique du bassin versant non urbanisé. Il s'agit d'un logiciel développé par the Hydrologic Engineering Centers of the US Army Corps of Engineers (USACE, 2000b). Il a été choisi étant donné qu'il répond à nos exigences et objectifs (outil classique de modélisation). Il assure la modélisation hydrologique des bassins non urbains, complexes pour de longues périodes de temps tout en tenant compte de tous les paramètres hydrologiques du bassin (évapotranspiration, fonte des neiges...) en plus qu'il accessible (gratuit).

4.3.3.2 Les composantes du modèle Hec Hms

Le modèle Hec Hms incorpore dans ses calculs les composantes suivantes :

- ❖ Module de calcul de la pluie nette,
- ❖ Module de l'écoulement de base
- ❖ Module du transfert (calcul de l'hydrogramme au niveau du chaque sous bassin),
- ❖ Module de laminage de l'hydrogramme.

Hec Hms comporte diverses méthodes pour le calcul d'une seule composante. Ces modules permettent de calculer l'hydrogramme à l'exutoire du bassin en tenant compte des différentes composantes physiques du bassin. Le choix de la méthode appropriée dépend essentiellement de la nature ainsi que la disponibilité des données fiables. Les méthodes qui ont été adoptées pour le calcul de chaque composante du processus hydrologique, se présentent comme suit :

➤ Méthode de calcul de la pluie nette : Deficit et constant

Le calcul des pertes en eau (les pertes en eau qui ont été infiltrées ou interceptées par les végétations ou accumulées dans les dépressions, et qui seront absorbées ultérieurement par le sol) a été élaboré par la méthode de Deficit and constant Loss. Elle est caractérisée par deux paramètres : the initial and the maximum deficit la capacité optimale d'infiltration quand le sol est saturé (f_c). Les premiers paramètres sont exprimés par la méthode SCS comme suit :

$$S = 254 * (100 / CN - 1) \quad [3.4]$$

$$I_a = 0.2 * S \quad [3.5]$$

Les coefficients de ruissellement CN ont été calculés en se référant aux données recueillies depuis le rapport de l'autorité du bassin de la Rivière-du-Nord (Abrinord, 2008).

L'évapotranspiration est un paramètre qui a été évalué pour les sous bassins afin d'évaluer les pertes par évaporation. En effet, son calcul est basé sur la formule de Thorenthwaite qui s'écrit comme suit :

$$ETP = 1.6 \left(\frac{10t}{I} \right)^a \quad [3.6]$$

où

t : température moyenne en °C pour le mois considéré

i : Indice Thermique

$$i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1.514} \quad [3.7]$$

$$I = \sum i$$

$$a = \frac{1.6}{100} I + 0.5 \quad [3.8]$$

➤ Méthode de transfert

Il existe plusieurs méthodes qui permettent de calculer l'hydrogramme de ruissellement direct. Les modèles résolvant les équations de l'onde cinématique, sont couramment utilisés. Cependant, ils n'ont pas été adoptés, dans le cadre de ce projet, La méthode de l'hydrogramme de Clark a été utilisée pour le calcul du processus de transformation des précipitations en hydrogramme de ruissellement direct. Les paramètres de cette méthode sont : le temps de concentration et le coefficient de stockage.

➤ Modèle d'écoulement de base

Parmi les diverses méthodes offertes par Hec Hms pour l'évaluation de l'écoulement de base, la méthode de Base flow Monthly Average a été prise en compte étant donné qu'il s'agit de la méthode qui s'adapte le mieux à la nature des données disponibles. Cette méthode consiste à attribuer un débit de base pour chaque mois et ceci pour chacun des sous-bassins. La consultation du site du Centre d'Expertise Hydrique du Québec a permis de déterminer les débits historiques minimum pour chaque mois pour la période allant de 1974 à 1978 des cinq stations de mesure de débits au niveau du bassin versant de la Rivière-du-Nord. Pour le cas des sous-bassins non jaugés, un transfert de débit entre les sous-bassins homogènes a été effectué, la formule suivante a été appliquée pour le transfert de débit.

$$Q_2 = Q_1 (A_2/A_1)^b \quad [3.9]$$

Avec;

Q_2 et A_2 : représentent respectivement le débit et la superficie du bassin non jaugé

Q_1 et A_1 : représentent le débit et la superficie respectivement du bassin jaugé

b : exposant déterminé statistiquement par régression.

La valeur de l'exposant oscille entre 0.6 et 0.9 (Anctil *et al.*, 2005) et une valeur de 0.8 est conseillée.

➤ Méthodes de laminage en rivières

En général, la plupart des méthodes du laminage sont toutes basées sur la résolution de l'équation de continuité et de la quantité de mouvement avec la méthode de différence finie tel que la méthode de l'onde cinématique et Muskingum-Cunge Model. Toutefois, ces méthodes exigent la disponibilité des données relatives à la géométrie des cours d'eau. C'est pour cette raison que la méthode de « Lag time » ou de temps de réponse a été utilisée pour le calcul des hydrogrammes.

4.3.3.3 Étalonnage et validation du modèle

La calibration a été faite tout en considérant la période de la fonte de la neige. Dans le modèle Hec Hms, le processus de la fonte de la neige a été considéré. Il est important de noter que la méthode de Temperature Index a été utilisée pour évaluer le processus de la fonte de neige. Le choix de cette méthode peut être justifié par le fait qu'il s'agit d'une méthode mature qui est fréquemment utilisée (les données liées au couvert nival de la région d'étude n'ont pas été disponibles). Les paramètres de la méthode de Temperature Index dont les valeurs de ces paramètres ont été attribués en se référant aux valeurs recommandées par le manuel Hec Hms.

- P_x : Température au-dessous de laquelle la pluie tombe sous forme de neige
- Base Temp : Température au-dessus de laquelle la neige fond
- Wetmeltrate : Vitesse de fonte de la neige quand il pleut
- Rain rate limit : Permet de distinguer entre une période sèche et une période humide
- Ati meltrate function : Fonction donnée par une table qui définit le taux de fonte de la neige en fonction de la température
- Cold limit : Coefficient en général fixé à 30 mm/jour
- Water capacity : Quantité maximale en eau que peut retenir la neige avant de s'écouler.

4.4 Modélisation hydraulique des rivières

Le MNT de la Rivière-des-Prairies a été modélisé avec le logiciel *Modeleur Hydrosim*. Le choix de ce modèle s'explique par le fait qu'en 2005, le CEHQ a élaboré une étude faite sur cette

rivière. Elle avait comme objectif la révision de crue de la rivière. D'où le MNT de la rivière qui a été déjà construit.

Le logiciel *Modeleur Hydrosim* a été utilisé pour la construction de la topographie et de la bathymétrie de la Rivière-des-Prairies. En effet, le Modèle Numérique de Terrain (MNT) de la Rivière-des-Prairies, monté par le CEHQ, a été construit à partir d'un semis de points formant un maillage. Il a été élaboré à partir des données fournies par le Service hydrographique du Canada de Pêche et Océans Canada, auxquels s'ajoutent des relevés topographiques couvrant l'ensemble des rives de la rivière effectués en 2001. Les informations fournies par chaque source permettent de construire un maillage topographique en triangulation de part et d'autre de la centrale hydroélectrique (CEHQ, 2005).

La figure 4.2 illustre la démarche adoptée pour la modélisation de la Rivière-des-Prairies dans contexte de climat futur. La première étape de modélisation est la construction du MNT de la rivière. Dans le cadre de ce projet, le MNT du cours d'eau, est disponible. La deuxième étape de la modélisation est la définition des conditions à la limite amont et aval du cours d'eau principal et de ses affluents. Deux scénarios de débits ont été choisi pour la simulation à savoir; la simulation du débit max représentant un cas d'évènement extrême ainsi que le débit moyen. Enfin, une analyse de l'impact du rehaussement du niveau de la rivière sur la plaine ainsi que sur les tabliers des ponts a été effectuée.

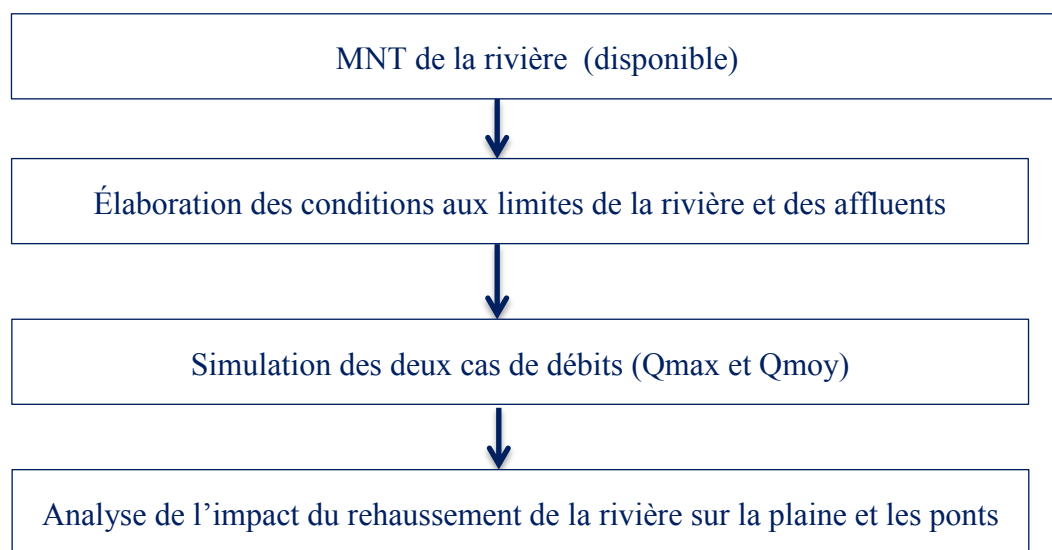


Figure 4.2 : Méthodologie de l'étude hydraulique élaborée sur la Rivière-des-Prairies

CHAPITRE 5 ÉTUDE DE CAS

5.1 Évaluation des apports du bassin versant en climat futur

5.1.1 Inventaire des données

La détermination des précipitations futures est basée sur l'approche des courbes IDF. Comme ça été déjà mentionné dans le chapitre 3, la pluie synthétique de type Chicago est une pluie couramment utilisée au Canada. Ce type de pluie a été utilisé pour la détermination des hyétogrammes de pluies des stations météorologiques localisées au niveau du bassin versant de la Rivière-du-Nord.

Les paramètres des courbes IDF pour les stations Ste-Agathe et St-Jérôme sont donnés aux tableaux 5.1 et 5.2.

La valeur du paramètre $r = 0.488$, adoptée dans cette étude est relative à la région de Montréal (Dorval) (MDDEFP, 2011). Le calcul de l'hyétogramme de Chicago est basé sur l'application de l'équation 3.4, pour une pluie de projet de durée 24 heures et de période de retour de 50 ans, mesurée aux stations Saint-Agathe et Saint-Jérôme.

Le calcul de l'hyétogramme de la pluie du climat futur consiste à majorer l'hyétogramme de pluie de Chicago calculé pour le climat de référence par le pourcentage préconisé par Mailhot et al. (2007). Tel que montré dans le tableau 2.1, l'averse choisie est une pluie de durée égale à 24h et d'une période de retour égale à 50 ans d'où le pourcentage de majoration associé à cette pluie, évalué à 1.5% par rapport aux pluies du climat de référence.

Les hyétogrammes de pluie du climat futur des deux stations météorologiques sont illustrés dans les figures 5.1 et 5.2.

Tableau 5.1: Paramètres des courbes IDF de la station Ste-Agathe (Environnement Canada, 2012)

T	a	b	c	r
	[mm/h]	[h]		
2	20.1	0	0.667	0.488
5	26.2	0	0.676	0.488
10	30.3	0	0.68	0.488
25	35.4	0	0.684	0.488
50	39.2	0	0.686	0.488
100	43	0	0.688	0.488

Tableau 5.2: Paramètres des courbes IDF de la station Saint-Jérôme (Environnement Canada, 2012)

T	a	b	c	r
	[mm/h]	[h]		
2	18.7	0	0.67	0.488
5	25.6	0	0.684	0.488
10	30.1	0	0.689	0.488
25	35.9	0	0.694	0.488
50	40.1	0	0.687	0.488
100	44.3	0	0.7	0.488

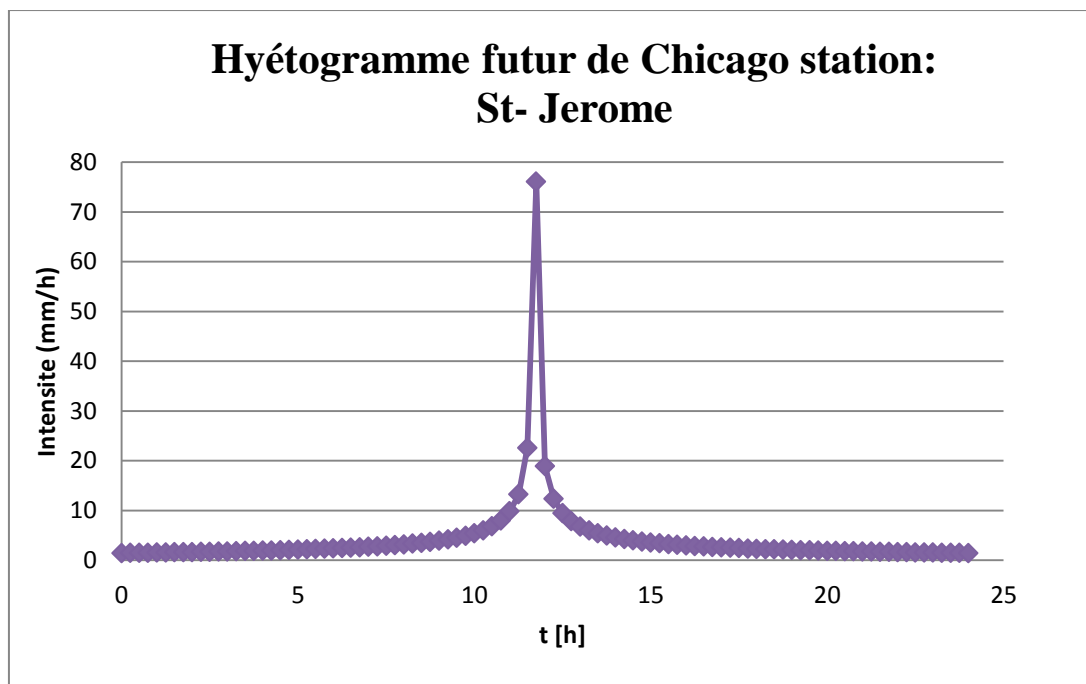


Figure 5.1 : Hyétogramme de Chicago pour le cas de la station Saint-Jérôme

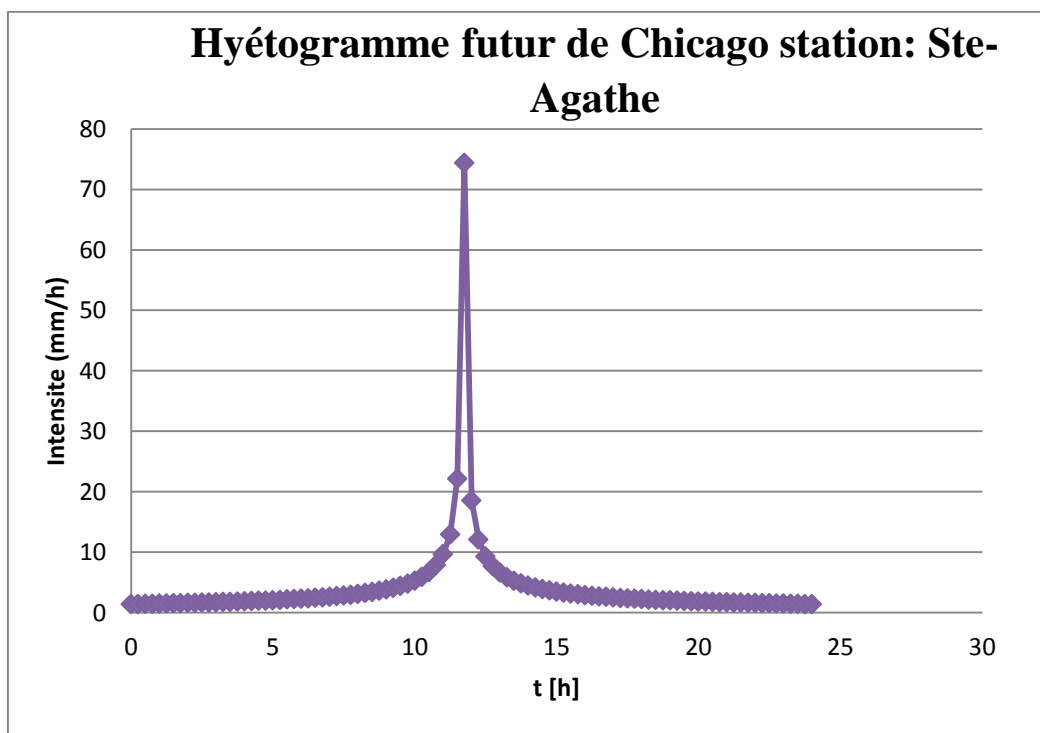


Figure 5.2 : Hyétogramme de Chicago pour le cas de la station Sainte-Agathe

À chacun des sous-bassins est associé un hyétogramme et une série chronologique de température en fonction du temps, de la station qui lui est le plus proche.

Avant les hyétogrammes futurs, les données sur la variation des précipitations, températures et débits en fonction du temps pour la période allant de 1972-1978 enregistrées au niveau des stations météorologiques du bassin versant, recueillies depuis le site d'Environnement Canada (2012) ont été définies dans le module météorologique du modèle pour la calibration et la validation .

5.1.2 Délimitation du bassin de la Rivière-du-Nord avec Hec Hms

La délimitation du bassin versant a été effectuée à l'aide du modèle Hec Géo-Hms (figure 5.3). Le tableau 5.3 résume les caractéristiques de chaque sous bassin versant évaluées à partir des données disponibles.

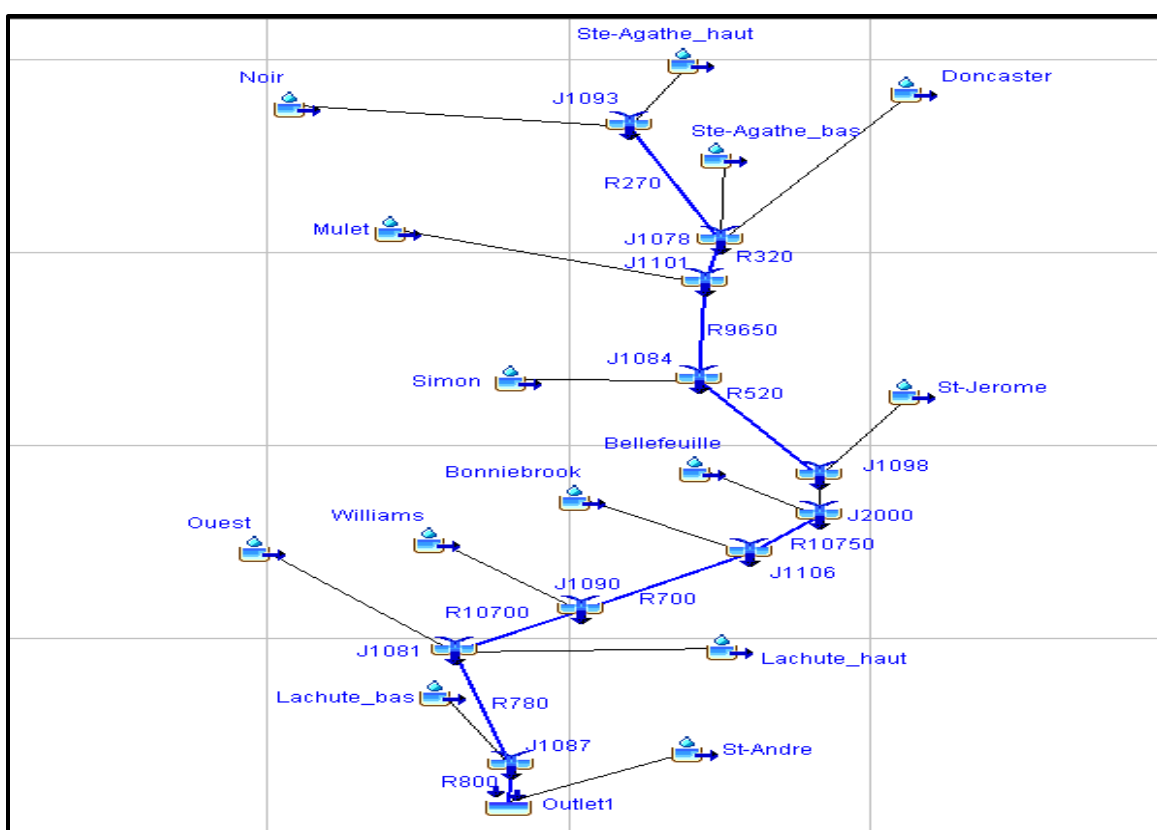


Figure 5.3 : Réseau du drainage du bassin de la Rivière-du-Nord Modules choisis pour le calcul de l'hydrogramme de ruissellement

Tableau 5.3: Caractéristiques des sous bassins versants du bassin versant de la Rivière-du-Nord

Nom du Bassin	Catégorie du sol	CN			Occupation du sol en %		
		agriculture	forets	urbanisation	agriculture	forets	urbanisés
Noir	B	75	60	98	2	93	5
Ste-Agathe haut					2	88	10
Ste-Agathe bas					2	86	12
Doncaster					2	93	5
Mulet					2	91	7
Simon					2	93	5
St- Jérôme					20	60	20
Bellefeuille					8	72	20
Bonniebrook					2	83	15
Williams					7	86	7
Lachute haut					15	65	20
Ouest					10	85	5
St-Andre					85	13	2
Lachute bas					75	15	10

5.1.3 Composantes de l'hydrogramme de ruissellement direct

Module d'évaluation des pluies efficaces : Cette méthode a été choisie pour l'évaluation des pluies efficaces. Comme mentionné dans le chapitre 2, la formule de Thorenthwaite a été utilisée pour le calcul de l'évapotranspiration (ETP). Les résultats du calcul de l'ETP pour les différentes stations météorologiques et pour les deux climats : passé et futur sont résumés dans les tableaux 5.4 et 5.5.

Tableau 5.4: Calcul de l'évapotranspiration du climat passé (1874-1978)

	St-Jérôme			Ste-Agathe			Lachute		
	t moyenne 1974 - 1978	i	ETP	t moyenne 1974 - 1978	i	ETP	t moyenne 1974 - 1978	I	ETP
	°C		mm / month	°C		mm / mois	°C		mm / mois
Jan	-12,58	0	0	-14,26	0	0	-12,66	0	0
Fev	-10,325	0	0	-11,68	0	0	-10,22	0	0
Mar	-5,175	0	0	-5,94	0	0	-3,96	0	0
Avl	3,84	0,23	0,8	1,96	0,25	0,8	4,34	0,81	2,0
Mai	12,78	5,5	7,7	10,98	3,3	5,3	13,06	4,23	6,5
Jun	17,575	7,0	9,1	15,6	5,6	7,8	17,875	6,7	9,0
Jul	19,725	9,2	11,	17,62	6,8	8,9	19,96	8,2	10,11
Aout	18,24	7,6	9,6	16,32	6,00	8,15	18,68	7,4	9,5
Sep	12,12	4,1	6,3	10,26	3,00	5,00	12,68	4,1	6,3
Oct	5,98	1,9	3,6	4,28	0,80	1,94	6,4	1,5	3,0
Nov	0,26	0,3	1,0	-1,48	0,00	0,00	0,6	0,04	0,3
Dec	-9,24	0	0	-10,76	0	0	-8,86	0	0

Tableau 5.5: Calcul de l'évapotranspiration du climat futur 2050

	St-Jérôme			Ste-Agathe			Lachute		
	t moyenne 2050	i	ETP	t moyenne 2050	i	ETP	t moyenne 2050	i	ETP
	°C		mm / mois	°C		mm / mois	°C		mm / mois
Jan	-9,58	0	0	-11,26	0	0	-9,66	0	0
Fev	-7,325	0	0	-8,68	0	0	-7,22	0	0
Mar	-2,175	0	0	-2,94	0	0	-0,96	0	0
Avl	6,84	1,607	3,208	4,96	0,988	2,273	7,34	1,788	3,460
Mai	15,78	5,698	7,860	13,98	4,743	6,903	16,06	5,851	8,009
Jun	20,575	8,514	10,445	18,6	7,308	9,374	20,875	8,703	10,608
Jul	22,725	9,897	11,619	20,62	8,543	10,470	22,96	10,052	11,748
Aout	21,24	8,935	10,807	19,32	7,741	9,764	21,68	9,216	11,048
Sep	15,12	5,341	7,508	13,26	4,378	6,522	15,68	5,643	7,806
Oct	8,98	2,427	4,295	7,28	1,766	3,430	9,4	2,601	4,511
Nov	3,26	0,523	1,450	1,52	0,165	0,640	3,6	0,608	1,612
Dec	-6,24	0	0	-7,76	0	0	-5,86	0	0

Les différents paramètres de la méthode de "Deficit and constant", pour les différents sous bassins sont donnés dans le tableau 5.6.

- Module de transfert : La méthode de l'hydrogramme unitaire de Clark a été utilisée pour le transfert. Elle est définie par deux paramètres à savoir les temps de concentration et le coefficient de stockage. Le tableau 5.7 résume les paramètres de la méthode de l'hydrogramme de Clark pour les sous bassins versants.

- Module de l'écoulement de base : La méthode de Base flow Monthly Average a été utilisée afin d'évaluer le débit de base des différents sous bassins versants. Le tableau 5.8 illustre les valeurs des débits déterminées pour chacun des sous bassins versants.

La modélisation de la fonte de la neige est prise en compte dans la modélisation hydrologique grâce à la méthode de Temperature Index, qui intègre l'approche de degrés-jours.

Comme mentionné dans le chapitre 2, la définition des seuils limites de température ainsi que les paramètres relatifs à la fonte de neige est indispensable (paramètres de la méthode Temperature Index).

Le tableau 5.9 résume les paramètres de la fonte de neige de la méthode Temperature Index.

Tableau 5.6: Paramètre de la fonte des neiges

Paramètre	Valeur	Unité
Base temperature	0	°C
wet meltrate	10	mm / °C - day
rain rate limit	2	mm / day
ATI meltrate coefficient	0,98	
Cold limit	30	mm / day
ATI coldrate coefficient	1	
water capacity	4	%
PX	0	mm / day

- Méthode de laminage en rivière : La méthode de Lag time a été utilisé pour le laminage des hydrogrammes en rivières jusqu'à l'exutoire. Les temps de parcours des hydrogrammes ont été déterminés grâce à l'application de la formule de Watt and Chow (tableau 5.10).

Tableau 5.7: Paramètres de la méthode de Deficit and constant

Bassin	SCS catégories du sol	Valeur CN selon l'occupation			occupation du sol [%]			S	Ia	Imp	fc	
		agriculture	forêts	urbanisation	agriculture	forêts	urbanisation	CN final	mm	mm	%	mm/h
Noir	B	75	60	98	2	93	5	62,2	154,4	30,9	5	5
Ste-Agathe haut					2	88	10	64,1	142,3	28,5	10	5
Ste-Agathe bas					2	86	12	64,86	137,6	27,5	12	5
Doncaster					2	93	5	62,2	154,4	30,9	5	5
Mulet					2	91	7	62,96	149,4	29,9	7	5
Simon					2	93	5	62,2	154,4	30,9	5	5
St-Jérôme					20	60	20	70,6	105,8	21,2	20	5
Bellefeuille					8	72	20	68,8	115,2	23,0	20	5
Bonniebrook					2	83	15	66	130,9	26,2	15	5
Williams					7	86	7	63,71	144,7	28,9	7	5
Lachute haut					15	65	20	69,85	109,6	21,9	20	5
Ouest					10	85	5	63,4	146,6	29,3	5	5
St-Andre					85	13	2	73,51	91,5	18,3	2	5
Lachute bas					75	15	10	75,05	84,4	169	10	5

Tableau 5.8: Données Méthode de transfert

Bassin	longueur du plus long parcours	pente bassin	Clark Storage coeff	Tc
	[km]	[%]	[h]	[h]
Noir	25,0	8,8	10	6,9
Ste-Agathe haut	25,1	7,8	10	7,2
Ste-Agathe bas	27,9	7,1	10	8,1
Doncaster	50,8	6,7	10	13,3
Mulet	35,5	9,3	10	8,9
Simon	36,3	8,1	10	9,5
St-Jérôme	53,3	4,8	10	15,9
Bellefeuille	20,0	3,2	10	8,5
Bonniebrook	34,8	4,2	10	12,0
Williams	27,6	3,3	10	11,0
Lachute haut	32,7	1,8	10	15,8
Ouest	52,4	5,2	10	15,1
St-Andre	30,4	0,9	10	20,1
Lachute bas	23,0	1,0	10	14,9

Tableau 5.9: Données du module d'écoulement de base

Bassin	Parametres de transfert			débit de base (minimum d'écoulement) [m³/s]											
	superf [km2]	bassin de référence	ratio	jan	fev	mar	avril	mai	jun	jul	août	sep	oct	nov	dec
Ste-Agathe haut	153,48			0,4	0,4	0,6	1	0,5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,5	0,5
Doncaster	223,24			1,7	1,7	1,7	5,3	4,4	1,9	1,8	1,2	1,4	1,6	2,6	2,4
Simon	161,22			2	1,6	1,4	5,1	2	1,3	0,8	0,7	0,8	1,9	2,8	2,4
Bonniebrook	89,42			0,8	0,5	0,5	2	0,5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5	1	0,8
Ouest	352,65			1,9	1,6	2	9,2	6,7	2,2	1,2	0,8	0,7	1,3	3,5	2,4
Noir	140,28	Simon	0,87	1,7	1,4	1,2	4,6	1,8	1,1	0,7	0,6	0,7	1,7	2,5	2,1
Ste-Agathe bas	139,95	Ste-Agathe haut	0,91	0,4	0,4	0,6	0,9	0,5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,5	0,4
Mulet	132,17	Simon	0,82	1,7	1,3	1,2	4,4	1,7	1,1	0,7	0,6	0,6	1,6	2,3	2
St-Jérôme	287,83	Simon	1,78	3,1	2,5	2,2	8,1	3,2	2	1,3	1,1	1,2	2,9	4,4	3,7
Bellefeuille	48,653	Bonniebrook	0,54	0,5	0,3	0,3	1,2	0,3	0,1	0	0	0	0,3	0,6	0,5
Williams	60,362	Bonniebrook	0,68	0,5	0,4	0,4	1,5	0,3	0,1	0,1	0,1	0	0,4	0,7	0,6
Lachute haut	169,28	Simon	1,05	2	1,6	1,4	5,3	2,1	1,3	0,8	0,7	0,8	1,9	2,9	2,4
St-Andre	137,75	Ouest	0,85	1,7	1,4	1,8	8,2	5,9	1,9	1,1	0,7	0,6	1,2	3,1	2,1
Lachute bas	74,3	Simon	0,83	0,6	0,4	0,4	1,7	0,4	0,1	0,1	0,1	0	0,4	0,8	0,7

Tableau 5.10 : Paramètres du module du laminage

Bief	Longueur	Tl
	[m]	[min]
R270	27850	292,1
R320	5284	71,34
R9650	50790	438,4
R520	35517	454
R10750	3776	112,8
R700	22591	422,7
R10700	7587	177
R780	18075	453,8
R800	1439	44,45

5.1.4 Étalonnage et validation

La calibration du modèle a été faite pour la période allant de 1974-1978 avec un pas de temps d'une journée. Les données de précipitations, température et de débits, disponibles dans le site d'Environnement Canada, ont été placées dans le module des données météorologiques. La seule station de jaugeage, la plus proche de l'exutoire, est celle du bassin versant Saint André (040118). Les données du modèle sont de deux types : les paramètres fixes à savoir les paramètres caractérisant les différents sous bassins tel que la pente, la superficie, temps de concentration, lag time, CN, le % d'imperméabilité ainsi que les données relatives à l'ETP. Et les paramètres de calage qui ont été initialement estimés à savoir l'abstraction initiale Ia, la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol et le coefficient de Clark.

La calibration du modèle Hec Hms montre que l'hydrogramme des débits simulés suit la même tendance que celui de l'hydrogramme des débits observés (figure 5.4). En analysant la séquence de l'événement allant du janvier 1975 au juillet 1975, on peut remarquer qu'il y a peu de synchronisation entre les débits observés et ceux simulés. Ceci peut être expliqué par le fait que durant le mois de janvier les températures étaient trop basses faisant geler les précipitations tombées sur tout le territoire. Les eaux en provenance de la neige fondue à partir du mois d'avril font que les débits ruisselés ont tendance d'augmenter jusqu'à atteindre un pic mais qui est en retard par rapport au pic des débits observés. Mais de façon globale, le modèle reproduit assez fidèlement le comportement du bassin versant. On peut donc justifier à posteriori le choix des outils de calcul considérant les données disponibles, la validité démontrée par de nombreuses études, des modèles invoqués pour simuler les hydrogrammes de cette rivière.

Pour valider la calibration du modèle HEC Hms, une simulation a été effectuée pour la période allant de juin 1972 jusqu' à décembre 1973. On remarque qu'au cours de la période allant du mois de janvier jusqu'au mois de mai 1973, les débits observés et simulés ne se concordent pas. Ceci peut être expliqué par le fait que les apports en provenance de la fonte de la neige rejoignent l'écoulement de façon tardive (figure 5.5).

5.1.5 Simulation de la pluie future du bassin versant de la Rivière-du-Nord

Simulation de la pluie future de Chicago

Une fois que le modèle hydrologique a été calibré, une simulation de l'hydrogramme de Chicago du climat futur a été effectuée. Le résultat de la simulation faite avec le modèle Hec Hms est illustré à la figure 5.6.

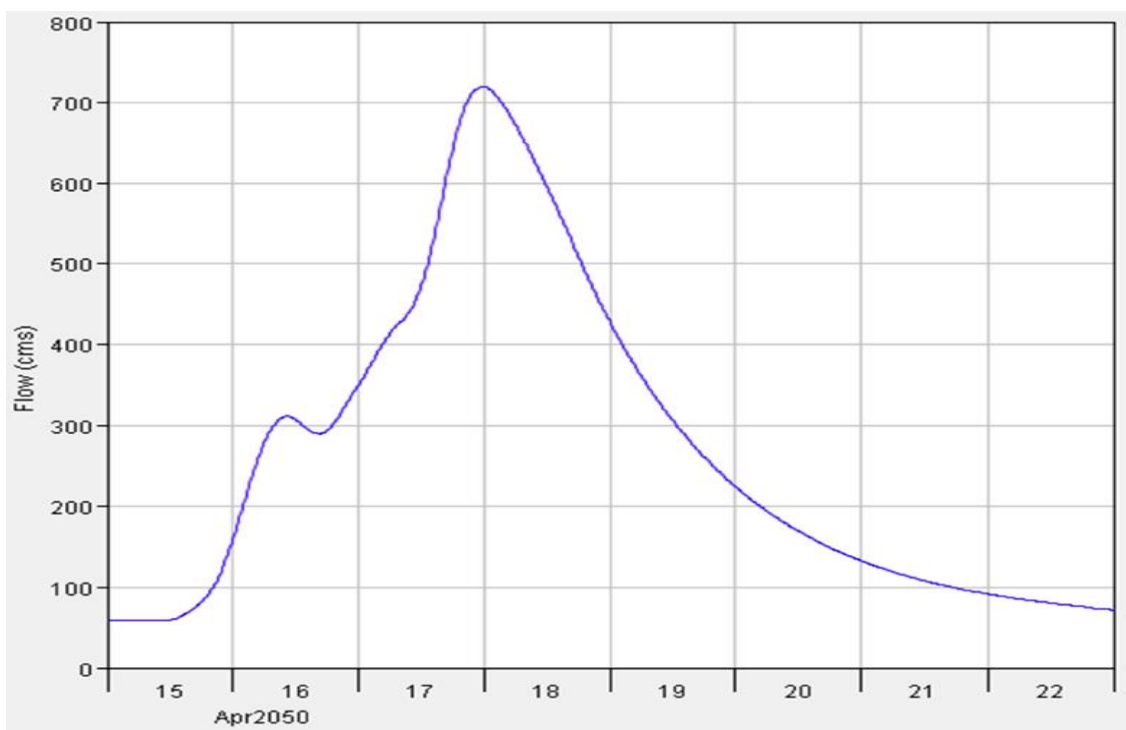


Figure 5.4: Hydrogramme du climat futur du bassin de la Rivière-du-Nord: cas d'une pluie future de 24h et de T=50 ans

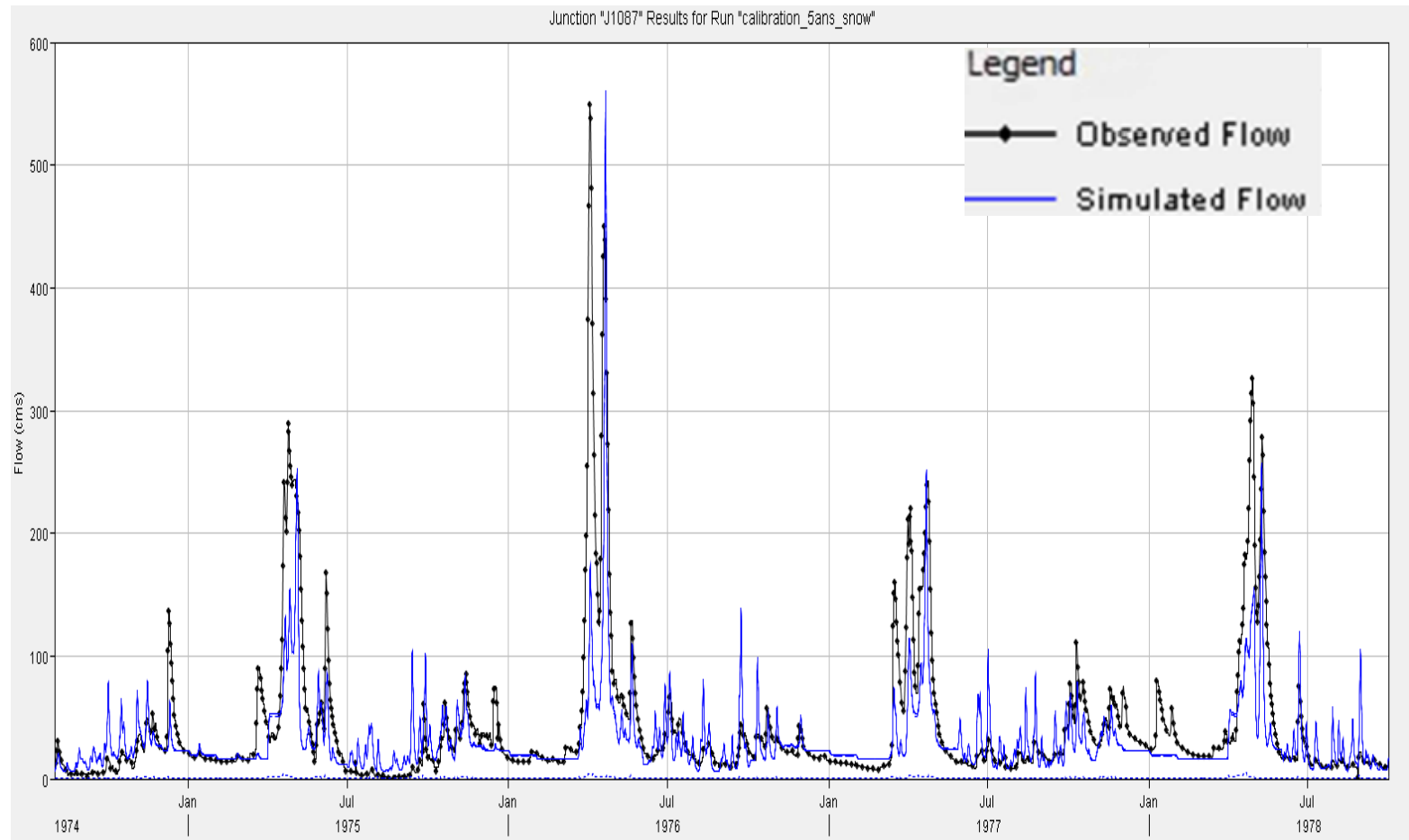


Figure 5.5 : Comparaison des hydrogrammes

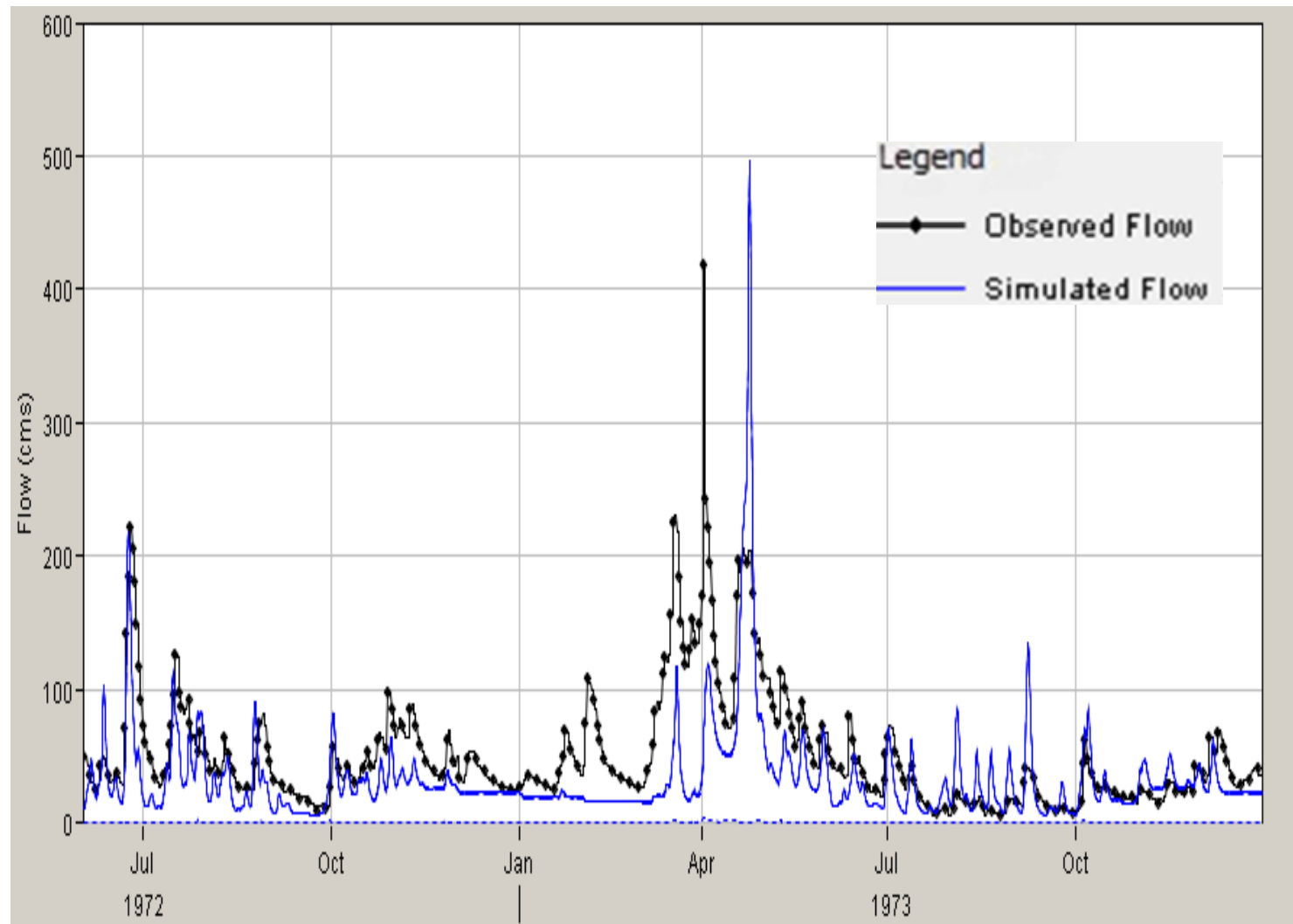


Figure 5.6 : Validation du modèle Hec Hms (période allant de 1972-1973)

Finalement, le bassin de la Rivière-du-Nord contribue, dans le cas du climat 2041-2070 avec un débit maximum de $702 \text{ m}^3/\text{s}$. En effet, la consultation des données de débits historiques publiées dans le site du CEHQ, a montré que les débits évacués sont aux alentours de $500 \text{ m}^3/\text{s}$.

La modélisation hydrologique du bassin du Rivière-du-Nord tout en considérant comme hyétogramme de pluie du climat futur, un hyétogramme triangulaire pour le même événement pluvieux (24h et $T=50$ ans). Dans le cas de cette simulation, le bassin versant de la Rivière-du-Nord pourra évacuer un débit max d'une valeur égale à $682 \text{ m}^3/\text{s}$. Ce débit max est inférieur à celui de l'hydrogramme simulé avec l'hyétogramme de Chicago d'une valeur évaluée à $702 \text{ m}^3/\text{s}$ (figure 5.7). Ceci démontre que le choix de l'hyétogramme n'a pas d'impact significatif sur le résultat simulé.

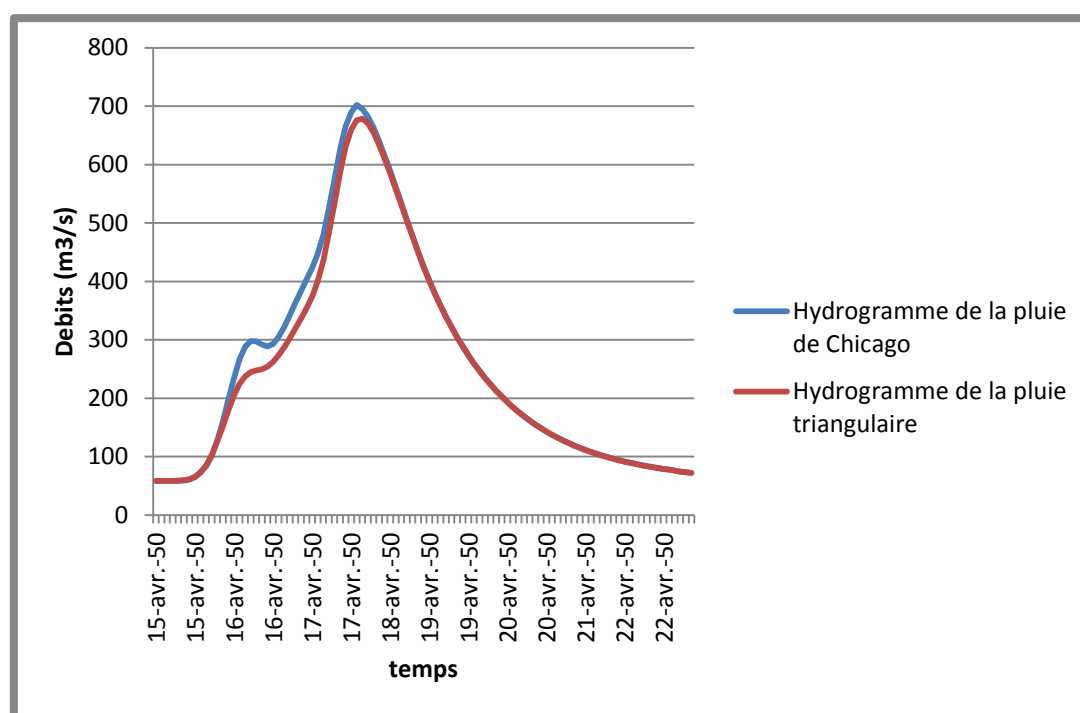


Figure 5.7 : Comparaison entre l'hydrogramme de la pluie de Chicago vs la pluie triangulaire

5.1.6 Hydrologie des affluents de la rivière des Outaouais

Notre étude hydrologique prend en considération seulement le bassin de la Rivière-du-Nord. Le débit évacué par les cours d'eau des autres bassins versants en amont (les autres bassins de la rivière des Outaouais) est évalué à partir des mesures de débit au niveau du barrage Carillon,

localisé juste en aval de ces bassins. Par conséquent, le débit total à l'entrée du lac des Deux Montagnes est égal à la somme du débit à l'exutoire du bassin de la Rivière-du-Nord et du débit mesuré au niveau du barrage Carillon, au quel on doit ajouter les apports des sous bassins en aval de Carillon autres que celui de la Rivière Du Nord. L'évaluation des débits futurs qui seront évacués dans le climat futur par le barrage du Carillon n'a pas encore fait le sujet d'une étude. Le débit maximum mesuré au cours de la période allant de 1972 à 1978 au niveau du bassin de la Rivière-du-Nord (station Saint André) a une valeur égale à $549 \text{ m}^3/\text{s}$ et a été enregistré le 03 avril 1976.

Afin de pouvoir évaluer le taux d'augmentation du débit du climat futur en fonction du débit du climat passé, le rapport entre le débit simulé dans le climat futur (2041-2070) qui est d'une valeur égale à $702 \text{ m}^3/\text{s}$ (débit qui pourra être évacué par le bassin de la Rivière-du-Nord) et celui observé a été quantifié. La valeur calculée montre que le débit du climat futur est presque 1,3 fois plus grand que le débit observé.

À partir des données de débits mesurés au niveau de la station du barrage Carillon au cours de la période allant de 1972 jusqu'à 1978, la moyenne des débits journaliers enregistrés au cours du mois d'avril a été calculée et elle est égale à $3868,57 \text{ m}^3/\text{s}$. On adopte une hypothèse qui suppose que le débit futur qui pourra être évacué par le barrage est 1,3 fois plus grand que celui du climat passé (on suppose qu'il s'agit du même taux d'augmentation du débit futur que celui du bassin du-Nord). D'où le débit qui pourra être déversé par le barrage dans le climat 2041-2070 et qui est égal à $5029,14 \text{ m}^3/\text{s}$.

Afin de calculer le débit total de la Rivière-des-Mille-Îles (apports du lac des Deux-Montagnes apports du bassin versant de la Rivière-des-Mille-Îles), la même méthodologie appliquée pour le cas du bassin de la Rivière-du-Nord peut être utilisée (transformation des pluies en débits avec Hec Hms). Cependant, vu la complexité de ce bassin, la contribution en eau de la rivière des Mille- Îles a été estimée. En effet, selon les études réalisées par le CEHQ et COBAMIL le bassin versant de la Rivière-des-Mille- Îles contribue seulement 6% du débit de la rivière, le reste provient des apports du Lac des Deux-Montagnes. L'analyse des données de débits enregistrés au niveau de la Rivière-des-Mille-Iles pour le mois d'avril, a prouvé qu'en moyenne cette rivière évacue près $486 \text{ m}^3/\text{s}$. En tenant compte des apports du bassin de la Rivière-des-Mille-Îles, le débit évacué à l'exutoire du bassin versant de la rivière est égal à $29,16 \text{ m}^3/\text{s}$. Le débit moyen

évacué par le bassin de la Rivière-du-Nord au mois d'avril est égal à $157,85 \text{ m}^3/\text{s}$. D'où le débit à l'exutoire du bassin de la Rivière-des-Mille-Îles qui représente à peu près 18,47 % du débit de la Rivière-du-Nord. Les hydrogrammes de la Rivière-des-Prairies ainsi que de ses affluents sont représentés à la figure 5.8.

Afin de valider et déterminer l'ordre de grandeur des hydrogrammes résultant de la modélisation du bassin de la Rivière-du-Nord, la consultation du site web du CEHQ a montré l'existence d'une station hydrométrique 043301 au niveau de la zone du Cheval Blanc, qui représente une zone de connexion entre l'entrée de la Rivière-des-Prairies et le tributaire de l'Île Bigras. Les données de débits couvrent la période allant de 1923 à 2010. Le tableau 5.11 fournit les données historiques enregistrées à la station 043301.

Tableau 5.11: Débits historiques enregistrés à la station 043301 (CEHQ, 2013)

	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
Débit moyen mensuel	943,1	930,9	1064	1682	1639	1236	993,5	835	789,4	896,3	1041	1035
Débit moyen max	1403	1611	1887	2691	2773	2651	1579	1291	1282	1646	1769	1683

En effet, le débit maximum simulé pour le cas du climat futur ($1825 \text{ m}^3/\text{s}$) dépasse la valeur de débit moyen enregistré au mois d'avril au niveau de la station 043301. Par contre, ce débit est inférieur au débit maximum du mois d'avril enregistré au niveau de cette station qui est égal à $2691 \text{ m}^3/\text{s}$. D'où le débit max simulé qui représente environ 15% de celui enregistré.

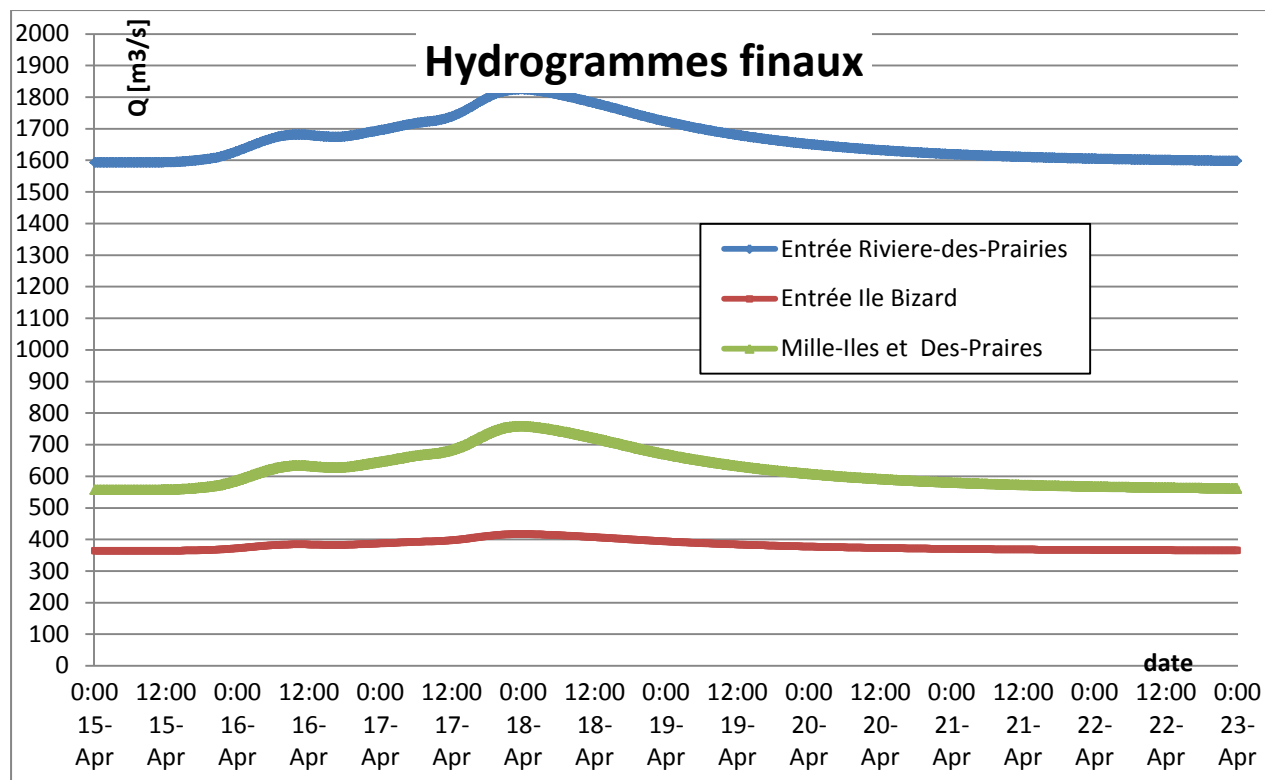


Figure 5.8 : Hydrogrammes de la Rivière-des-Prairies et de ses affluents

5.2 La modélisation de la Rivière-des-Prairies

La modélisation hydraulique de la rivière permet de simuler les niveaux d'eau dans le cours d'eau résultant d'un événement pluvieux de forte amplitude.

5.2.1 Données disponibles

Les données indispensables pour la simulation de la rivière se classifient suivant deux catégories à savoir :

- Les données relatives à la rivière : comme expliqué précédemment, le MNT de la Rivière-des-Prairies (topographie, bathymétrie, rugosité) calibré a été utilisé pour notre étude. Ce MNT a été construit de part et d'autre du barrage d'Hydro-Québec étant donné que le barrage est une centrale au fil d'eau (le barrage d'Hydro-Québec n'a pas été pris en compte lors de la modélisation de la topographie de la rivière) et que le modèle est sensible à la chute hydraulique causée par la mise en place du barrage.

La définition de la rugosité de la rivière et de la plaine inondable a été mise en œuvre dans une partition appelée partition de coefficients de frottement. Dans le cas de la Rivière-des-Prairies, deux partitions de coefficients de frottement ont été définies suivant la topographie de la rivière: 1- partition de coefficients de frottement amont barrage et 2- partition de coefficients de frottement aval barrage. Selon le rapport du CEHQ (2005), les coefficients de rugosité définissant le frottement du lit mineur ainsi que le lit majeur ont été déterminés à la suite des analyses des échantillons du sol ainsi que l'exploitation des photographies conventionnelles et aériennes. Les matériaux composants le lit du cours d'eau varie de l'argile au roc. Les berges et la plaine inondable de la rivière sont principalement urbanisées, en plus de quelques superficies occupées par des champs ou des gazons (CEHQ, 2005). Les différentes occupations du sol de la plaine inondable de la rivière sont illustrées à la figure 5.9.

- Les débits à simuler et qui sont : le débit maximum défini comme étant le débit extrême, résultant d'une précipitation du climat futur (2041-2070) de durée égale à 24h avec un T=50 ans) ainsi que le débit moyen calculé à partir du rapport entre le volume total et la durée totale de l'hydrogramme.

5.2.4 Calage du MNT de la Rivière-des-Prairies

Le modèle numérique de la rivière a été calibré par le CEHQ en se basant sur les campagnes de mesures de débits du 22/04/2002 et 27/11/2003 au cours desquelles des débits importants ont été enregistrés (CEHQ, 2005). La rugosité de la rivière était le principal paramètre de calage du modèle puisqu'il s'agit d'un paramètre ayant une forte influence sur le niveau de la rivière. Les résultats de calibration du modèle, faite par le CEHQ, pour quelques sections du cours d'eau sont illustrés à la figure 5.10. La comparaison entre les niveaux observés et simulés pour le cas du même événement pluvieux montre que le MNT de la rivière a été bien calibré.

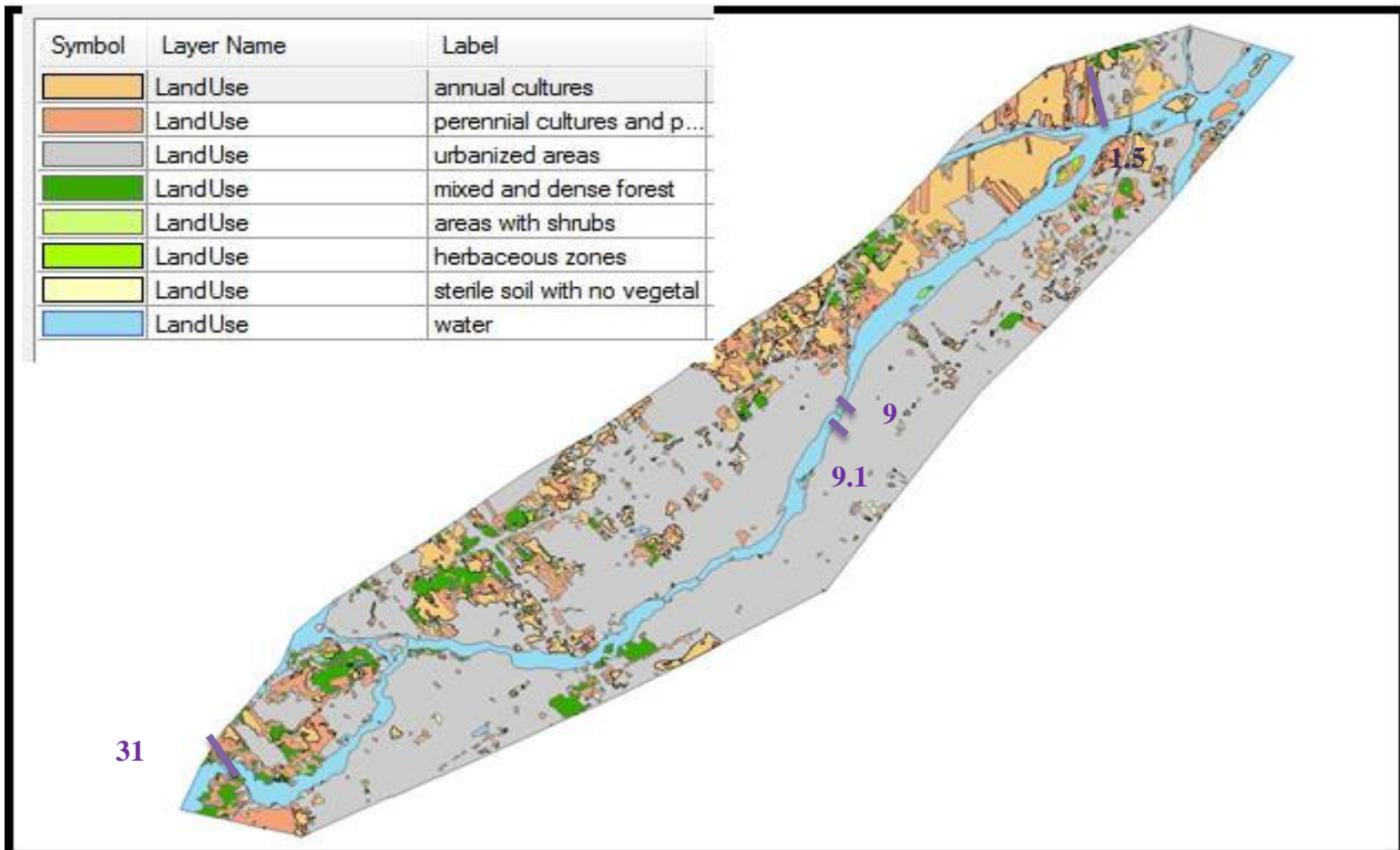


Figure 5.9: Occupation des sols de la plaine inondable de la Rivière-des-Prairies (Géo base, 2013)

5.2.5 Simulations des niveaux d'eau

5.2.5.1 Simulation Q_{max} et Q_{moy}

Avant de procéder à la simulation de la rivière, les conditions aux limites indispensables pour le processus de modélisation ont été définies. Étant donné que le MNT de la rivière a été élaboré de part et d'autre de la position du barrage, ces conditions devront être définies de la même manière (conditions en amont et en aval du barrage).

En effet, pour le tronçon amont de la rivière, les Q_{max} des hydrogrammes de la Rivière-des-Prairies et des affluents (cas d'un événement extrême) ont été établis comme condition limite amont et un niveau d'eau a été établi comme condition à la limite aval.

De la même manière, pour la modélisation du Q_{moy} (deuxième scénario), les Q_{moy} des hydrogrammes de la Rivière-des-Prairies et des affluents ont été établis comme condition limite amont et un niveau d'eau a été établi comme condition à la limite aval.

5.2.5.2 Résultats des simulations

La simulation des deux cas de scénarios de débits en régime permanent a permis de simuler les lignes d'eau. Ces lignes superposées sur la topographie de la plaine de la rivière, du côté de l'île de Montréal seulement, permettent de délimiter les zones vulnérables aux inondations.

La superposition des niveaux d'eau résultant de la modélisation des deux cas de débits du climat futur 2050 sur la topographie de la rivière est illustrée aux figures allant de la figure 5.11 à la figure 5.20. Le tableau 5.12 illustre les niveaux d'eau simulés au niveau de quelques sections d'écoulement pour les deux scénarios.

Tableau 5.12: Niveaux d'eau simulés (Qmax et Qmoy) pour quelques sections significatives

Position par rapport à la Rivière-des-Prairies	H (Q moy)	H (Qmax)
Début du tronçon amont (DTA)	23.20	24.60
Pont Jacques Bizard	22.60	24.03
Fin du tronçon amont (FTA)	22.01	23.24
Pont Lachapelle	19.55	20.70
Pont Louis Bisson	19.82	21.06
Pont Viau	17.50	17.66
Section juste amont le barrage (Jam)	17.11	17.37
Section juste après le barrage (Jap)	11.0	12.23
Pont Pie 9 (après le barrage)	9.94	11.54
Pont Charles de Gaulle	6.80	9.67

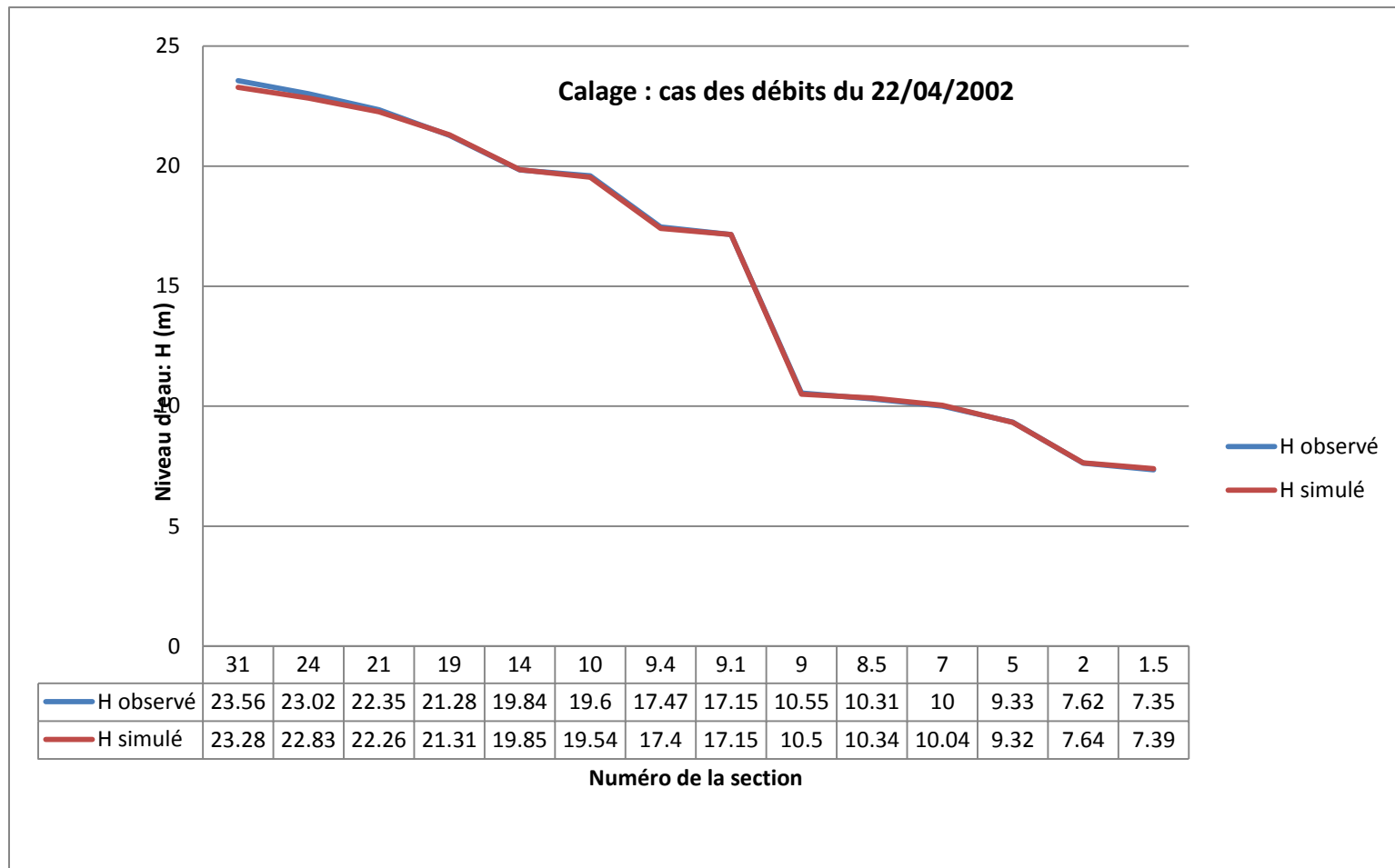


Figure 5.10 : Calage du modèle (cas des débits de la pluie 22/04/2002) (CEHQ, 2005)

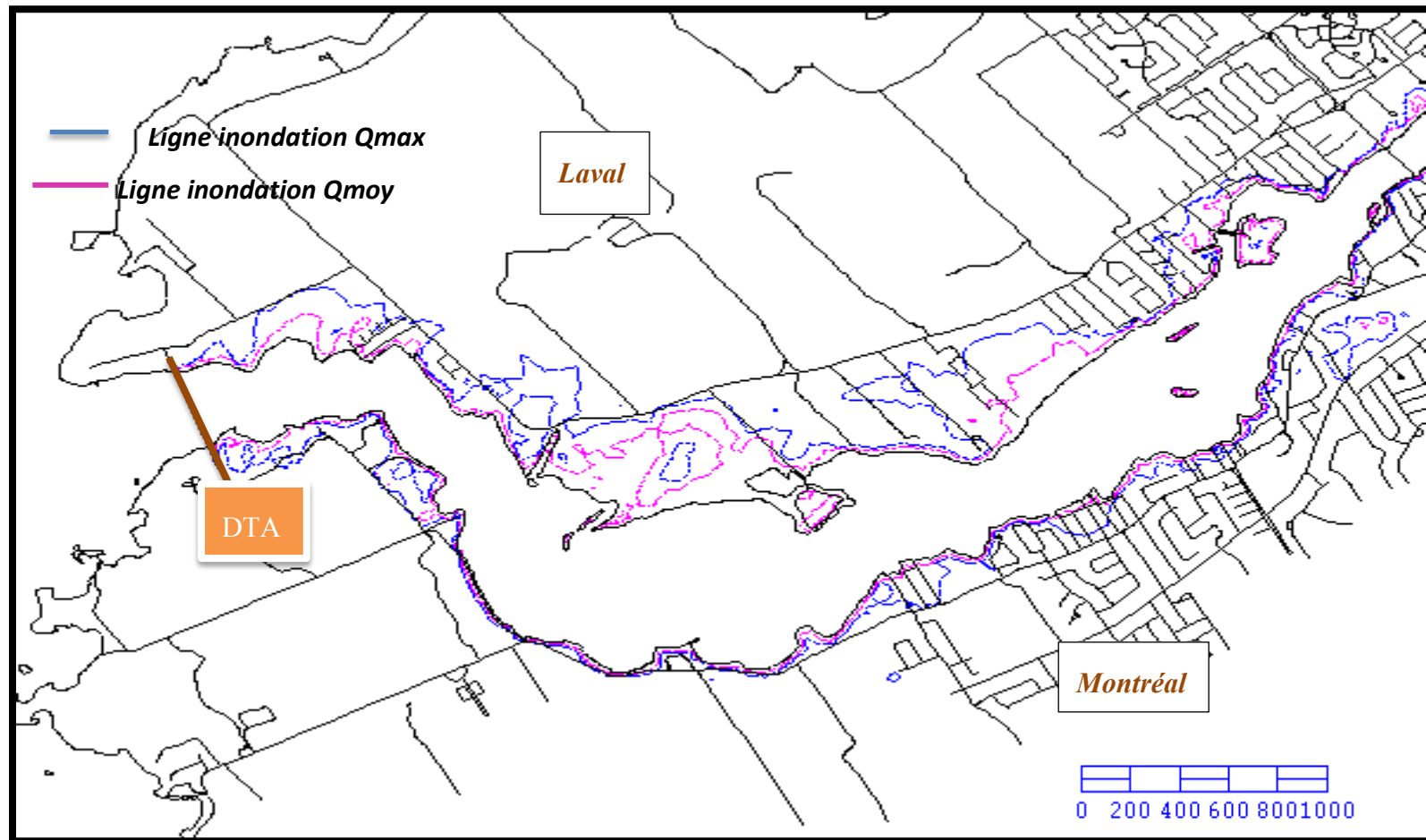


Figure 5.11 : Étendue de la zone d'inondation pour les cas du Q_{moy} et Q_{max} de $Pk = 0$ à $Pk = 8.5$
(secteur amont du barrage)

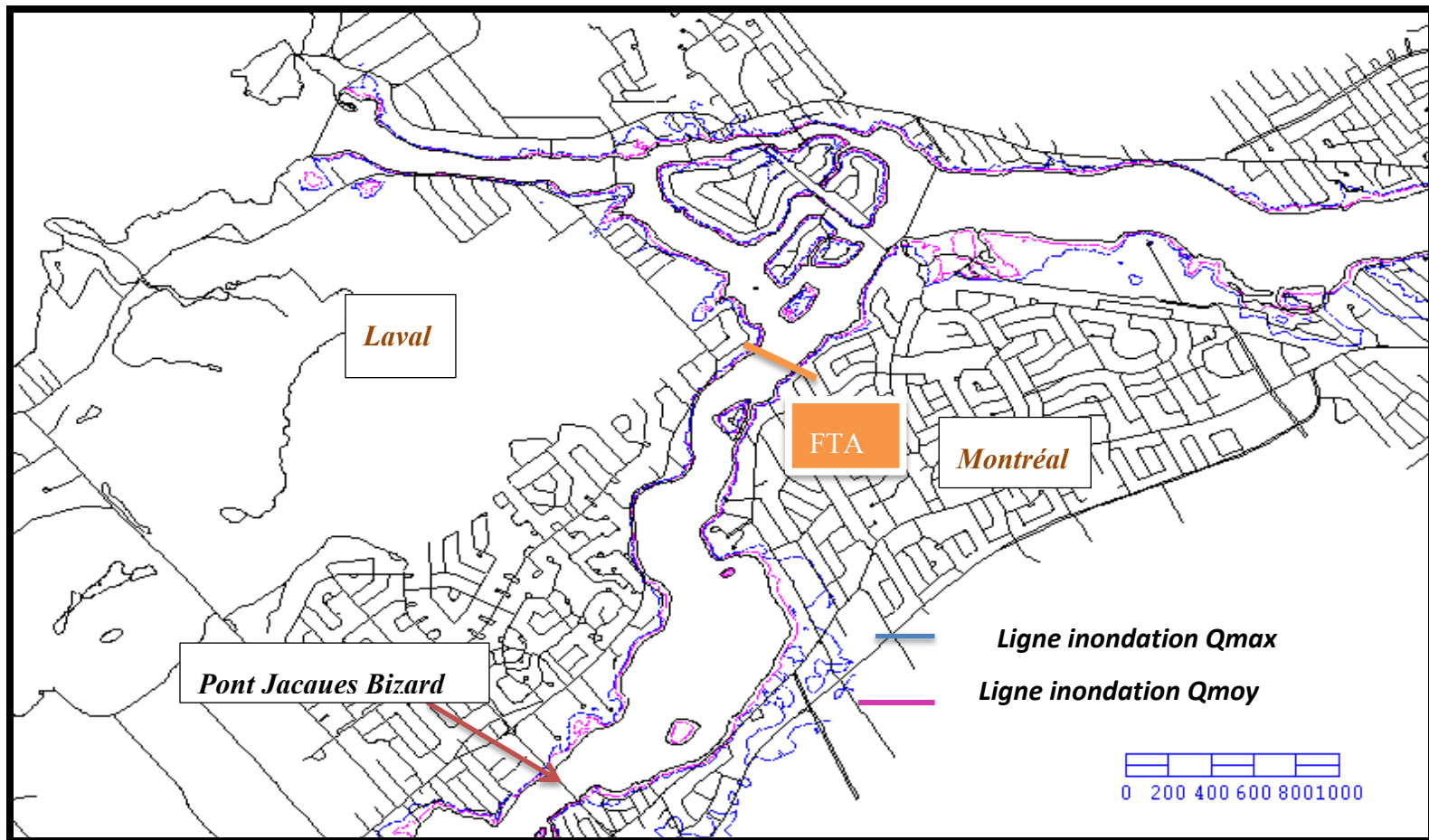


Figure 5.12 : Étendue de la zone d'inondation pour les cas du Q_{moy} et Q_{max} de $Pk = 8.5$ à $Pk = 12.5$

(secteur amont du barrage)

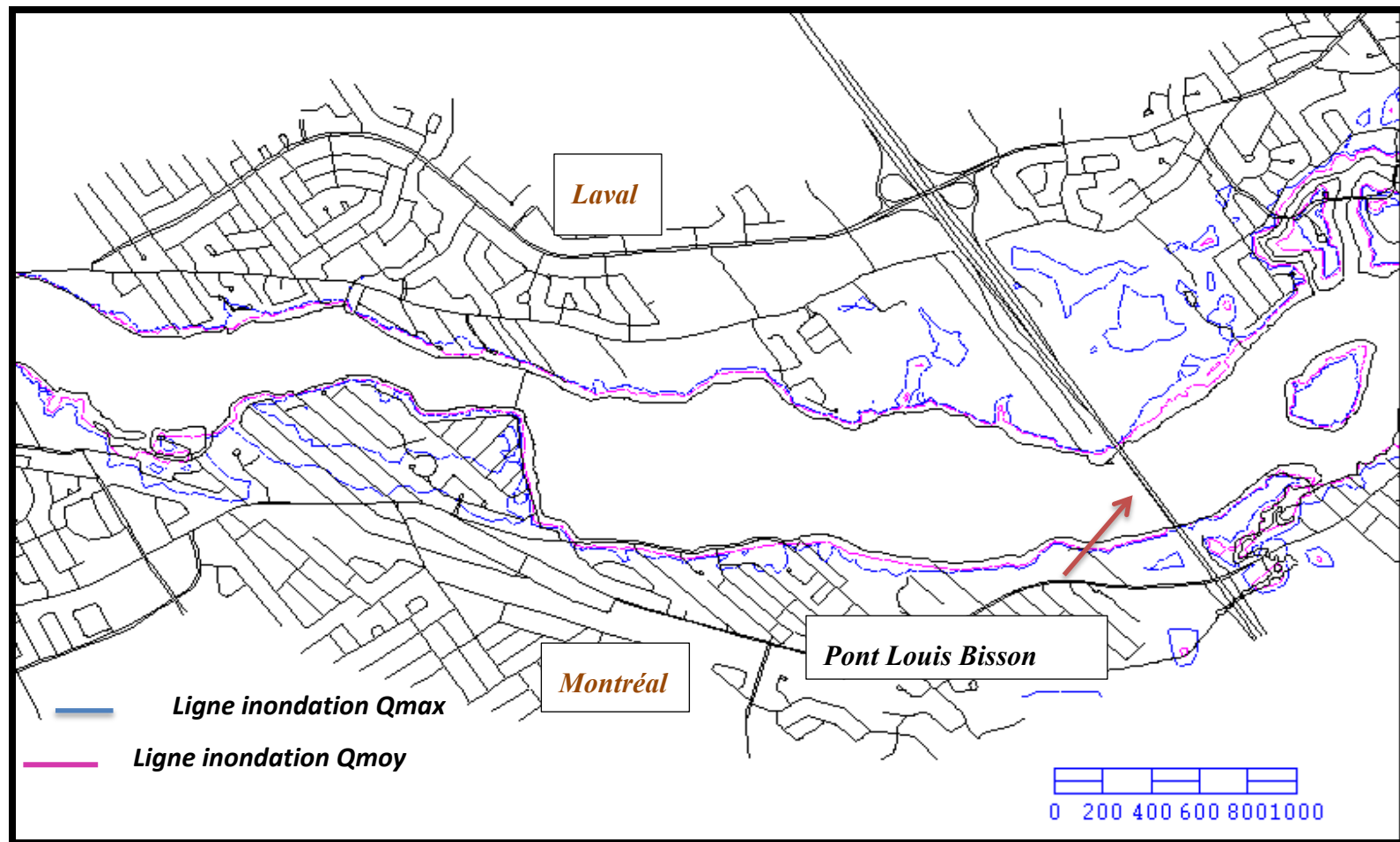


Figure 5.13: Étendue de la zone d'inondation pour les cas du Qmoy et Qmax de Pk =12.5 à Pk=18.5

(secteur amont du barrage)

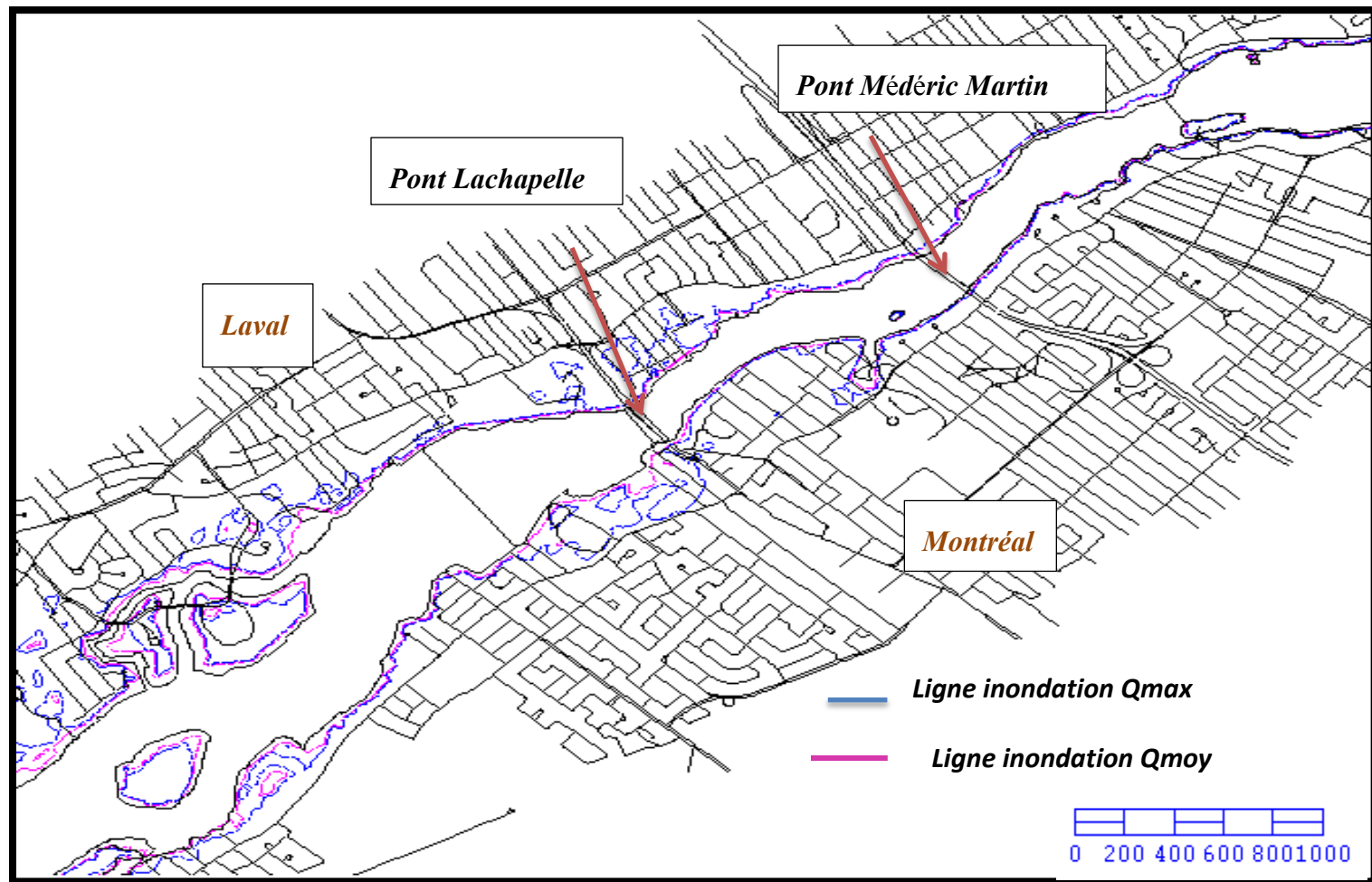


Figure 5.14 : Étendue de la zone d'inondation pour les cas du Q_{moy} et Q_{max} de $Pk = 18.5$ à $Pk = 21.5$
(secteur amont du barrage)

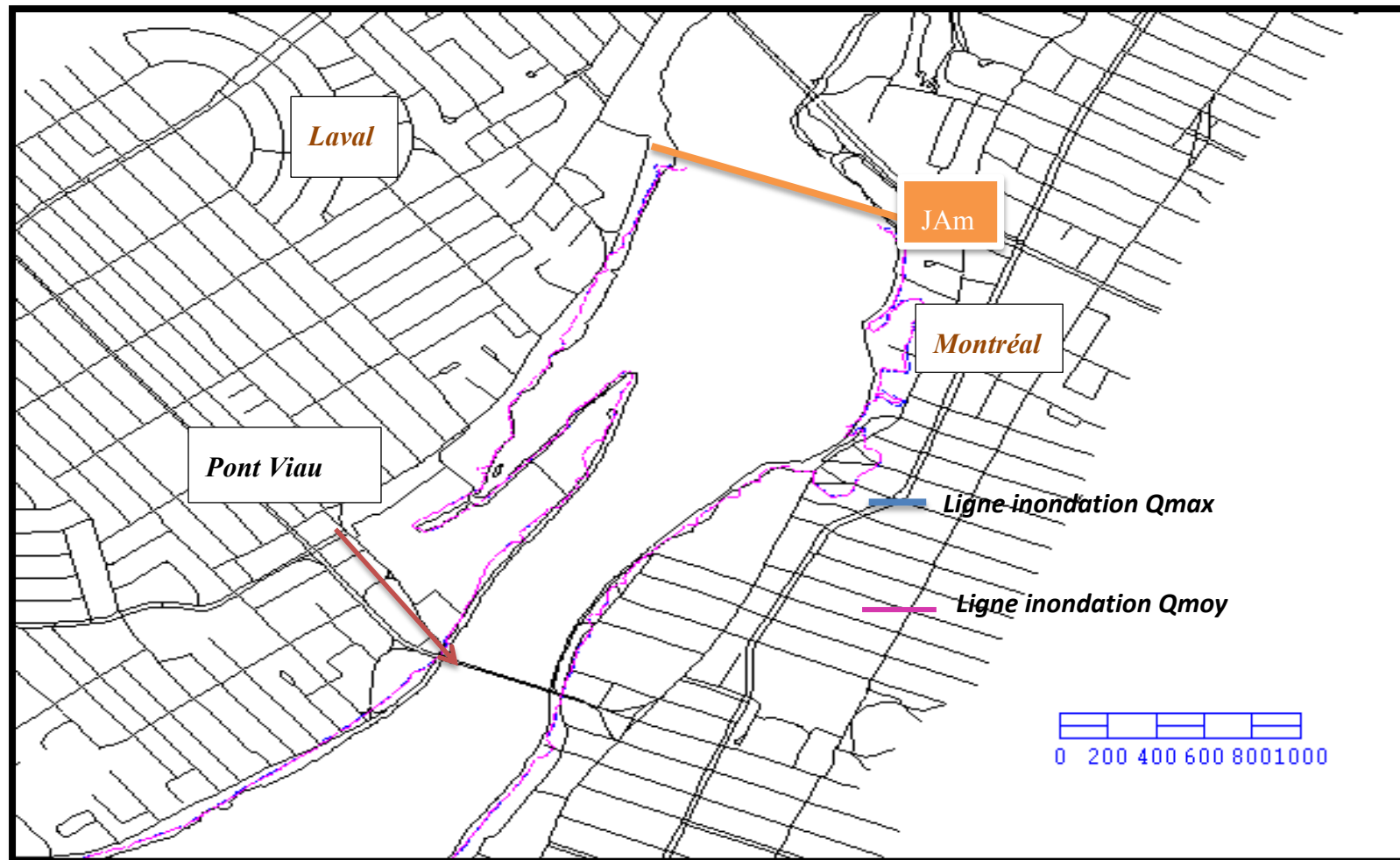


Figure 5.15: Étendue de la zone d'inondation pour les cas du Q_{moy} et Q_{max} de $Pk = 21.5$ à $Pk = 22.5$
(secteur amont du barrage)

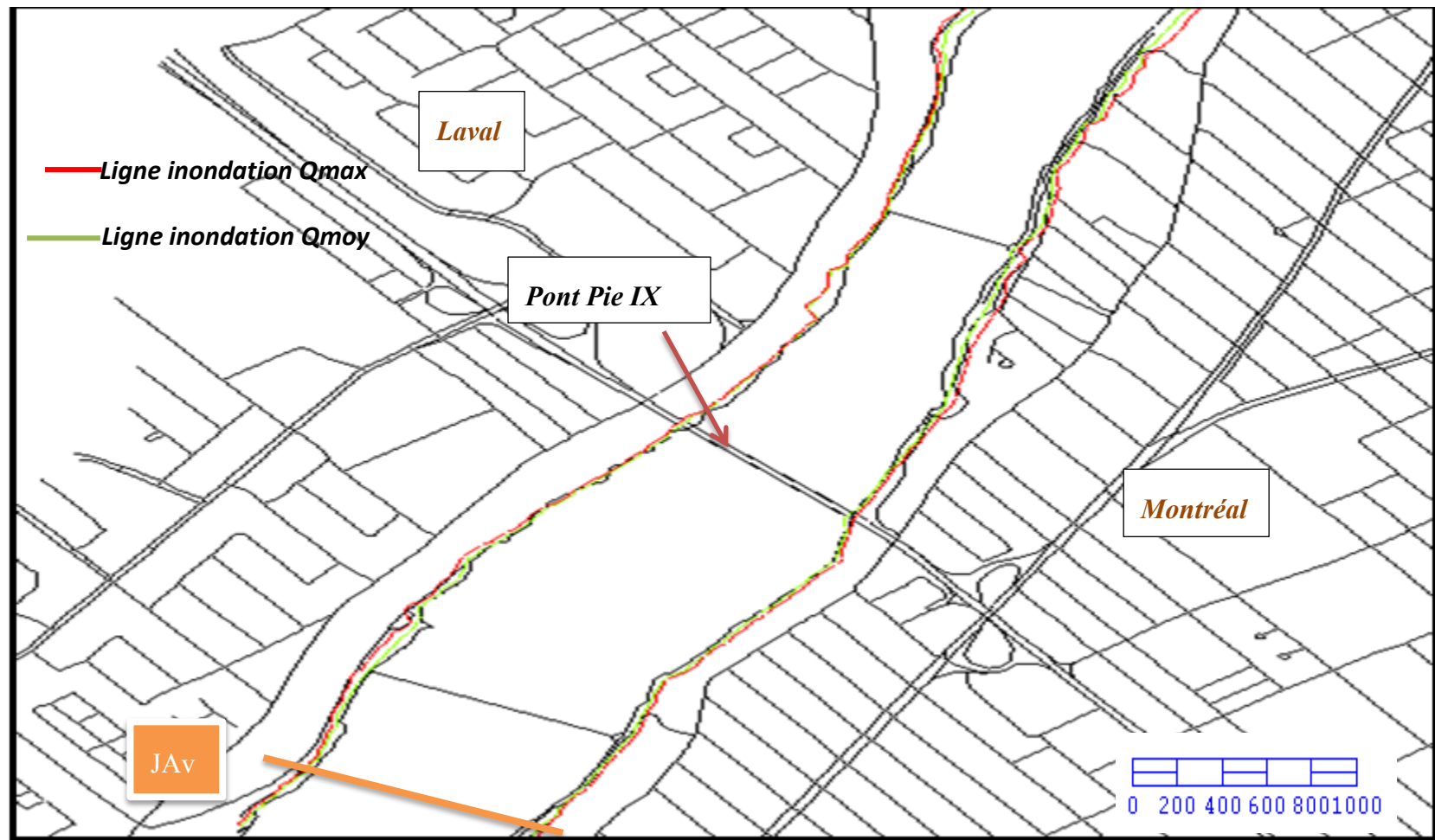


Figure 5.16: Étendue de la zone d'inondation pour les cas du Q_{moy} et Q_{max} de $Pk = 0$ à $PK = 3km$
(secteur aval du barrage)

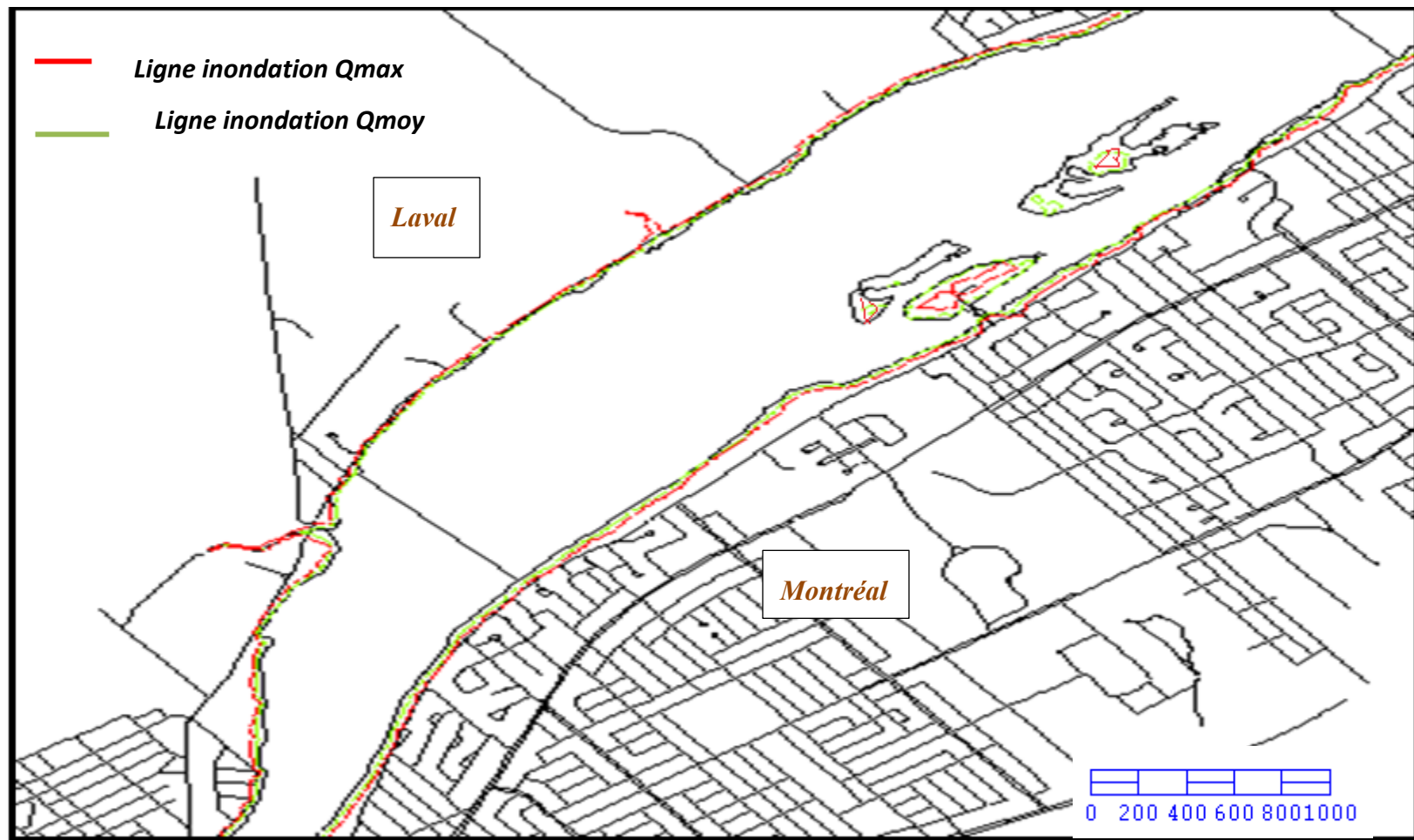


Figure 5.17: Étendue de la zone d'inondation pour les cas du Q_{moy} et Q_{max} de $Pk = 3$ à $PK = 8.5$
(secteur aval du barrage)

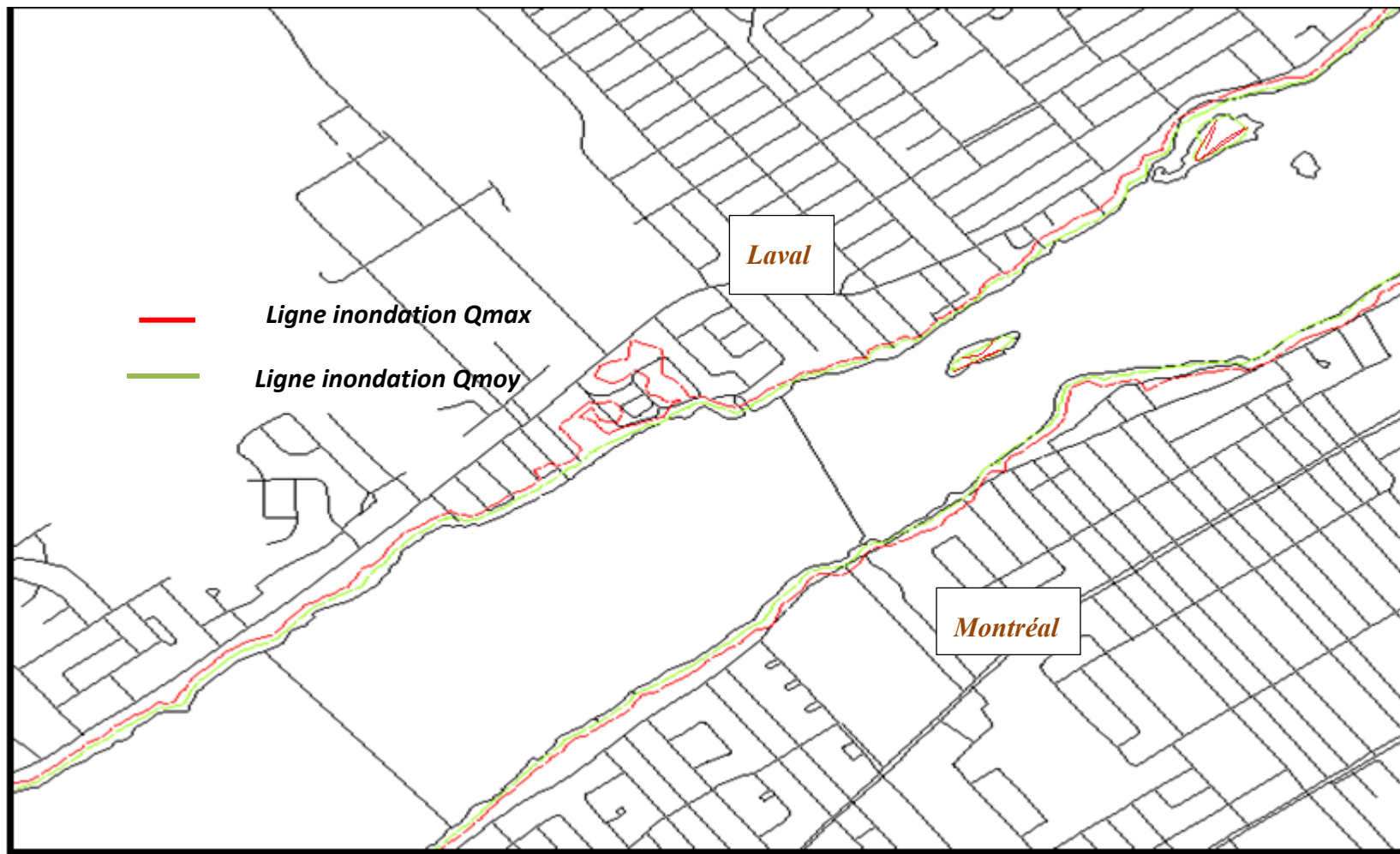


Figure 5.18: Étendue de la zone d'inondation pour les cas du Q_{moy} et Q_{max} de $Pk = 8.5$ à $PK = 11.5$ km
(secteur aval du barrage)

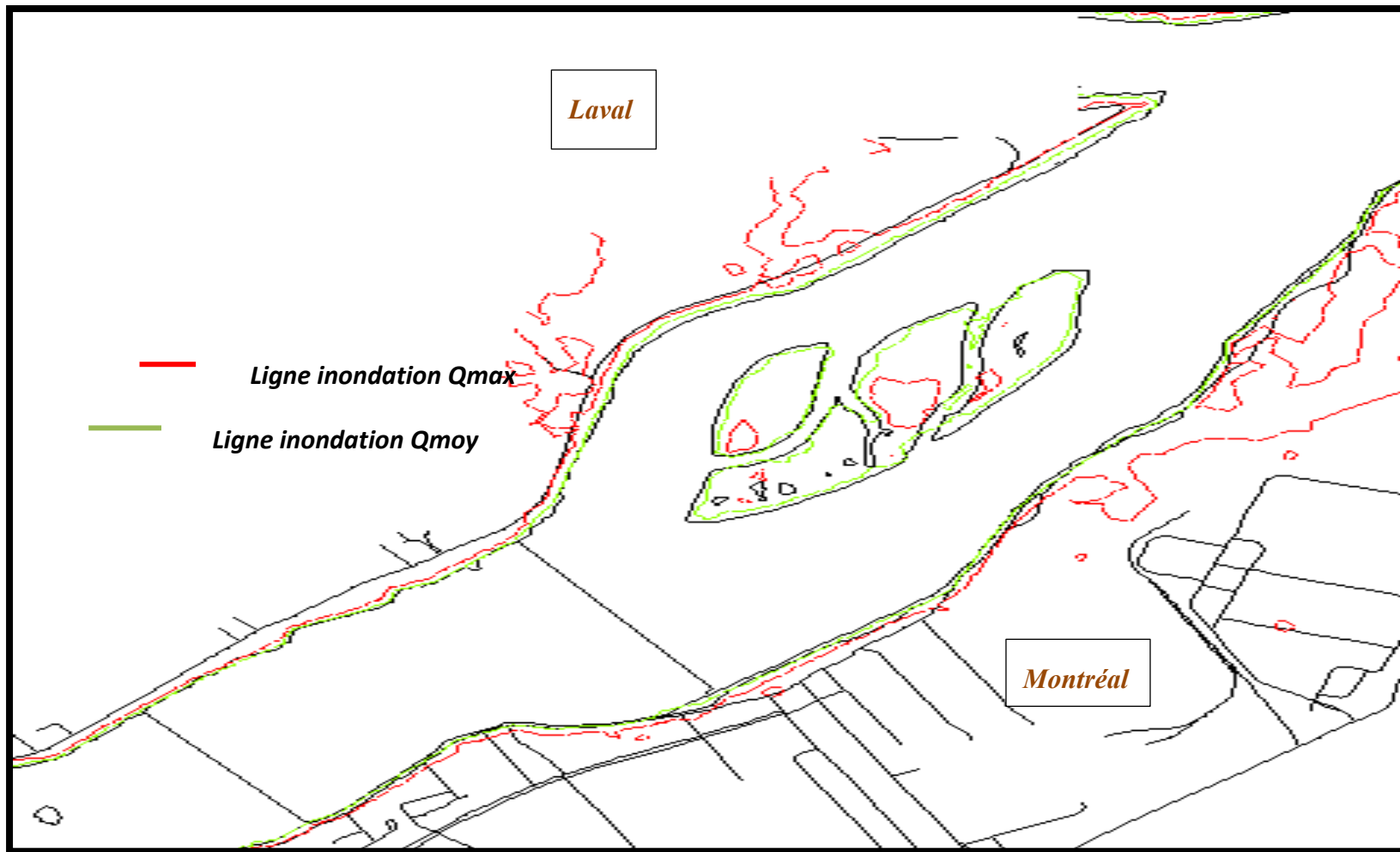


Figure 5.19: Étendue de la zone d'inondation pour les cas du Q_{moy} et Q_{max} de $Pk = 11.5$ à $PK = 14.5$ km
(secteur aval du barrage).

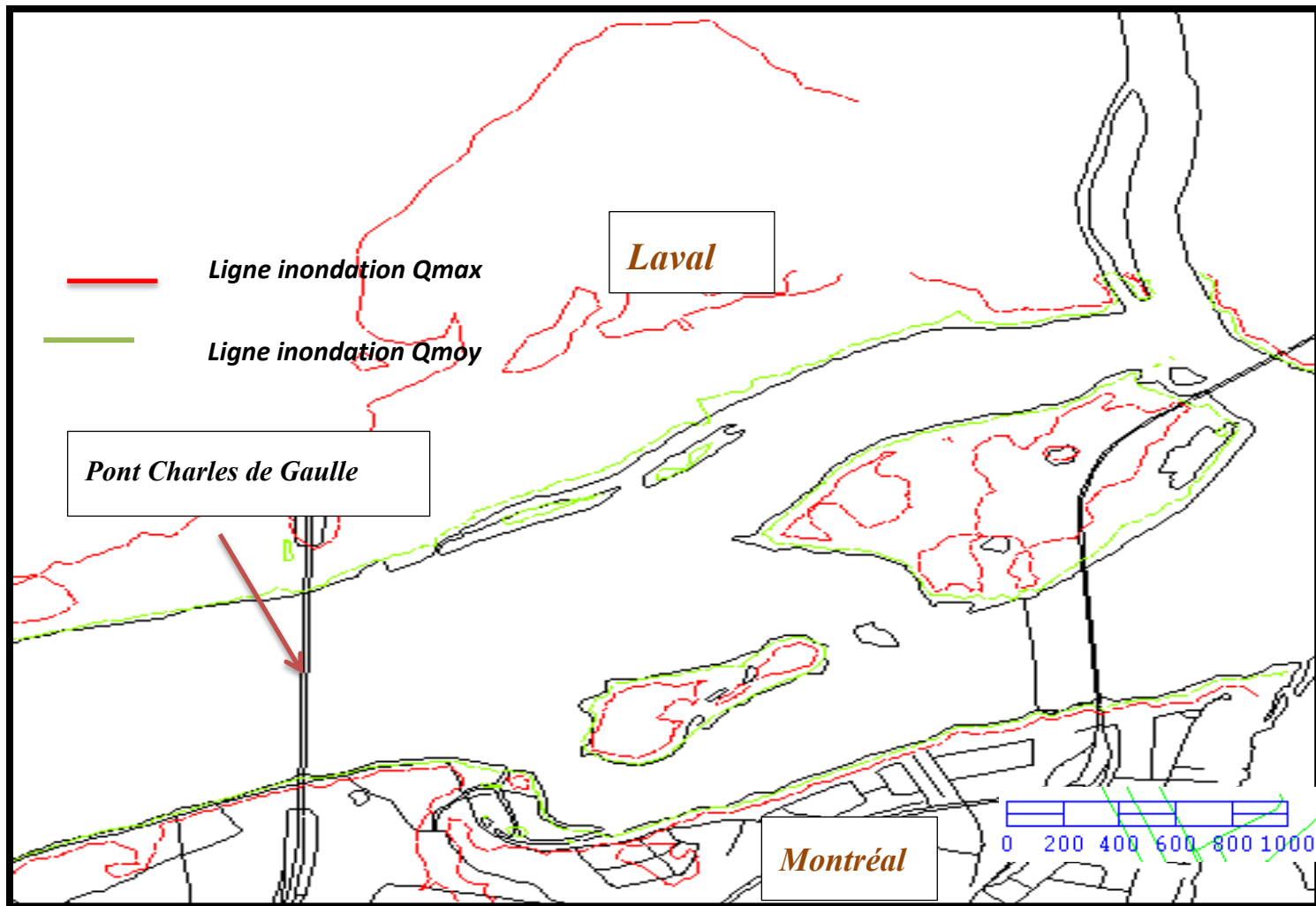


Figure 5.20: Étendue de la zone d'inondation pour les cas du Q_{moy} et Q_{max} de $Pk = 14.5$ à $PK = 17.5$

(secteur aval du barrage)

5.3 Analyse de sensibilité du niveau de la Rivière-des-Prairies

Les modèles climatiques représentent le seul moyen de prévision des caractéristiques du climat futur. Cependant, il faut être conscient qu'ils sont incapables de définir l'ampleur des incertitudes entachant les prévisions. Afin d'évaluer l'impact qu'auraient les incertitudes de prévision du climat futur, et des autres hypothèses posées dans la conduite de cette étude dont le facteur de majoration des débits mesurés à Carillon et la répartition des débits entre les rivières de l'archipel de Montréal, une analyse de sensibilité du niveau de la rivière (et par conséquent de la limite de la zone inondable) a été réalisée en augmentant le débit maximum de +20%. Ce scénario a été pris en considération afin d'évaluer les incertitudes associées aux débits sur le niveau d'eau de la rivière (on suppose qu'il existe des imprécisions lors de l'évaluation du débit simulé). La comparaison des niveaux d'eau résultant de la simulation des deux scénarios de débit (Q_{\max} et $Q_{\max}+20\%$) est consignée au tableau 5.13.

Tableau 5.13 : Analyse de sensibilité du niveau de la rivière vis à vis de l'augmentation du débit maximum de +20%.

Position par rapport à la rivière	H (Q max)	H (Qmax +20%)
Début du tronçon amont	24.60	24.63
Pont Jacques Bizard	24.03	24.04
Fin du tronçon amont	23.24	23.28
Début du tronçon intermédiaire	22.55	22.58
Pont Lachapelle	20.70	20.72
Pont Louis Bisson	21.06	21.07
Pont Viau	17.66	17.67
Section juste en amont du barrage	17.37	17.55
Section juste après le barrage	12.23	12.25
Pont Pie 9 (après le barrage)	11.54	11.59
Section avant jonction Mille-Îles et Rivière-des-Prairies	9.67	9.69
Pont Charles de Gaulle	9.60	9.61

CHAPITRE 6 ANALYSE ET DISCUSSION DES RÉSULTATS

La vérification de l'état des zones inondables montre que la plupart des îles localisées au niveau de la rivière pourront être inondées à la suite de la simulation du Qmoy (par conséquent tout autre débit supérieur à Qmoy). L'analyse de l'état des lieux localisés du côté de l'île de Montréal (cas du Qmax) permet de conclure que les zones les plus vulnérables aux inondations sont les zones en amont du barrage. L'étendue de la zone inondable est variable tout en allant de l'amont vers l'aval. Parmi les zones les plus sensibles à l'inondation, la zone du côté du pont Bizard où l'étendue de la zone d'inondation dépassera les 200m. Les zones localisées du côté du Boulevard Gouin représentent des lieux vulnérables à l'inondation. L'étendue de la zone inondable dépassera les 400 m principalement au niveau des zones localisées à proximité du pont Lachapelle et du pont Louis Bisson en plus de la zone localisée du côté de l'île Bourdon (partie aval de la rivière).

En se référant aux résultats de la simulation du rehaussement du niveau de la rivière (cas du débit max) ainsi que des données fournies par la carte de la figure 6.1, une conclusion peut être tirée : La sensibilité de la population vis-à-vis aux inondations est forte du côté Est ainsi qu'au centre de l'île, caractérisée par des concentrations familiales et de jeunes populations. Cette catégorie de personnes vulnérables se trouve dans l'arrondissement Pierrefonds-Roxboro ainsi que la zone située entre le Boulevard Gouin et le chemin de fer. La zone localisée juste en amont du barrage est très sensible à l'inondation étant donné qu'elle est caractérisée par une concentration de résidences pour les personnes âgées. Le côté Ouest de l'île est caractérisé par une faible sensibilité vis-à-vis de l'inondation future (Ouranos, 2013b). La zone de Pointe aux trembles est caractérisée par une faible vulnérabilité sociétale étant donné qu'il s'agit d'une zone dominée par les zones vertes et caractérisée par une faible concentration familiale.

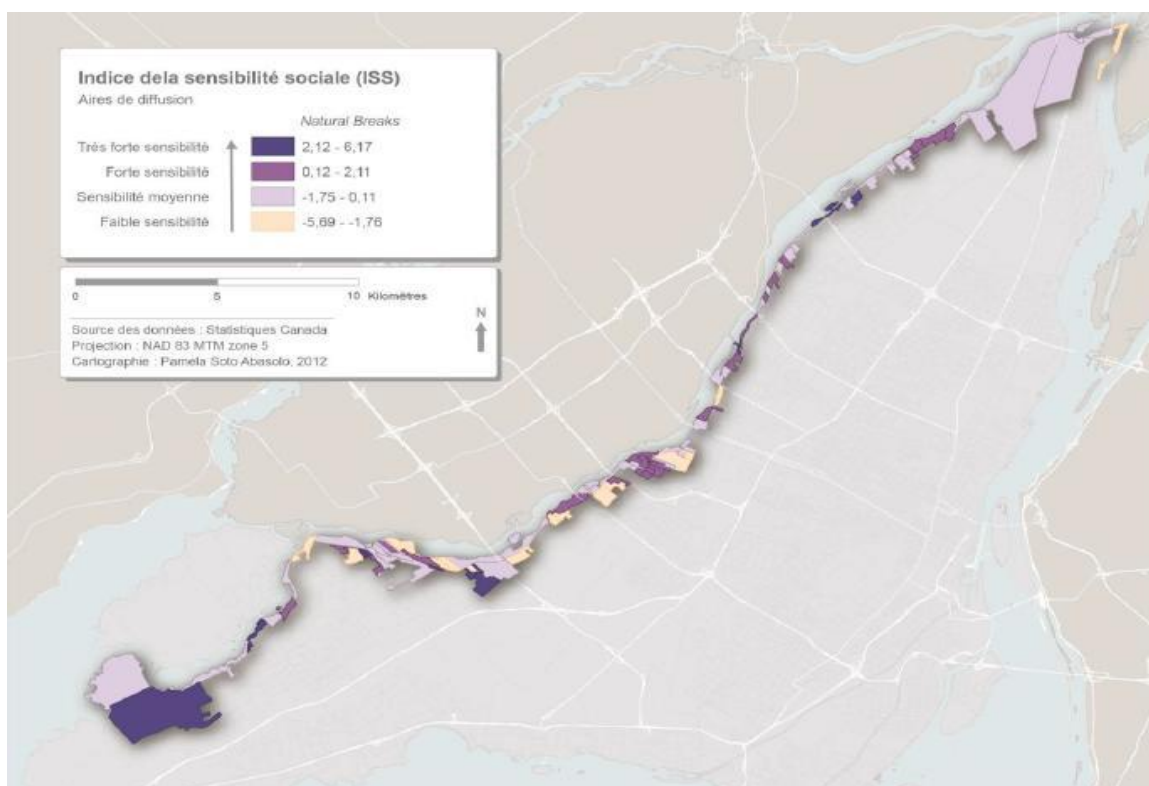


Figure 6.1 : Indice de la sensibilité sociale en fonction de l'emplacement sur l'île de Montréal (Ouranos, 2013b)

La sensibilité des infrastructures vis-à-vis de l'inondation a été aussi étudiée par Ouranos (Ouranos, 2013b). La carte de la figure 6.2 représente le degré de la vulnérabilité des infrastructures de l'île de Montréal face au rehaussement du niveau de la Rivière-des-Prairies pour un scénario d'augmentation du débit centennal (Ouranos, 2013b). Les principales infrastructures qui ont été prises en compte lors de l'étude de la vulnérabilité sont principalement les équipements et les constructions tels que : les écoles et garderies, les hôpitaux, les résidences pour les personnes âgées, bâtiments industriels et commerciaux, bâtiments résidentiels, réseaux routiers, etc. (Ouranos, 2013b). En se référant aux résultats de la simulation du Qmax ainsi que des données de la carte de la figure 6.2, la conclusion qui a été tirée est la suivante : La sensibilité des infrastructures face à l'inondation varie de faible à moyenne (principalement au niveau du centre et des extrêmes de l'île). Cependant, la forte sensibilité des infrastructures semble dispersée sur le long du territoire de la rive (Ouranos, 2013b). La zone de Pointes aux trembles, zone à faible risque en climat futur, est caractérisée par une faible sensibilité des infrastructures vis-à-vis à l'inondation. La zone du Cheval Blanc est caractérisée par une très forte sensibilité du

territoire (Ouranos, 2013b). Sa forte vulnérabilité provient du fait qu'il s'agit d'une zone à forte concentration résidentielle.



Figure 6.2 : Résultats de l'indice de la sensibilité territoriale (Ouranos, 2013b)

L'analyse de l'impact du rehaussement du niveau de la rivière, pour les deux cas de scénarios de débit, sur les ponts enjambant le cours d'eau a été développée. Elle est basée sur une comparaison faite entre les niveaux d'eau dans les sections des ponts et les élévations des tabliers. Les données sur les dimensions des tabliers ont été extraites à partir des plans de conception des ponts, élaborés par le ministère des Transports du Québec. La comparaison faite sur les niveaux d'eau simulés et les niveaux des tabliers des ponts montre que les niveaux simulés pour les deux cas de débits (moyen et max) sont inférieurs aux élévations des tabliers (tableau 6.1).

Par conséquent, le rehaussement du niveau de la rivière causé par les CC n'aura pas d'impact sur les ponts, qui sont conçus de manière sécuritaire.

Tableau 6.1: Comparaison entre niveaux d'eau moyen et max vs niveau des tabliers des ponts

Nom du pont	H du tablier (m)	H Q moy (m)	H Qmax (m)
Pont Jacques Bizard	28	22.60	24.03
Pont Lachapelle	23	19.55	20.70
Pont Louis Bisson	30	19.82	21.06
Pont Viau	27	17.50	17.66
Pont Pie 9 (après le barrage)	32	9.94	11.54
Pont Charles de Gaulle	19	6.80	9.67

La modélisation des niveaux d'eau possiblement atteints lors du débordement de la rivière moyennant le débit max majoré de +20% permet de conclure que les niveaux varient très faiblement par rapport aux niveaux d'eau simulés pour le cas du débit de référence (Q_{\max}). Et par conséquent, l'écart entre les limites des zones vulnérables aux inondations, résultantes de la modélisation des deux débits Q_{\max} et $Q_{\max}+20\%$ est très faible. La figure 6.3 illustre la limite de la zone inondable pour le cas des deux débits simulés (Q_{\max} et $Q_{\max}+20\%$). La ligne rose représente la limite de la zone inondable pour le cas du $Q_{\max}+20\%$ et la ligne bleue illustre la zone inondable pour le cas du Q_{\max} . Comme le montre la figure 6.3, les deux limites sont quasiment confondues. Et par conséquent, on peut conclure que l'augmentation de +20% du débit max n'aura pas d'effet majeur sur l'étendue de la zone inondable. L'effet négligeable de l'augmentation du +20% du débit max sur le rehaussement du niveau de la rivière peut être expliqué par le fait le débit augmenté est faible et que la topographie de la rivière est peu sensible à la variation du débit. En effet, la topographie de la Rivière-des-Prairies est une topographie très accidentée. Elle est composée d'un lit profond et creusé, qui a subi l'action de l'érosion. Les berges de la rivière ont de même subi les actions des phénomènes d'érosion (érosion des berges par le courant), ce qui fait que le volume de la section d'écoulement est assez important qu'une augmentation de 20% du débit n'a pas d'effet considérable sur le rehaussement du niveau de la rivière.

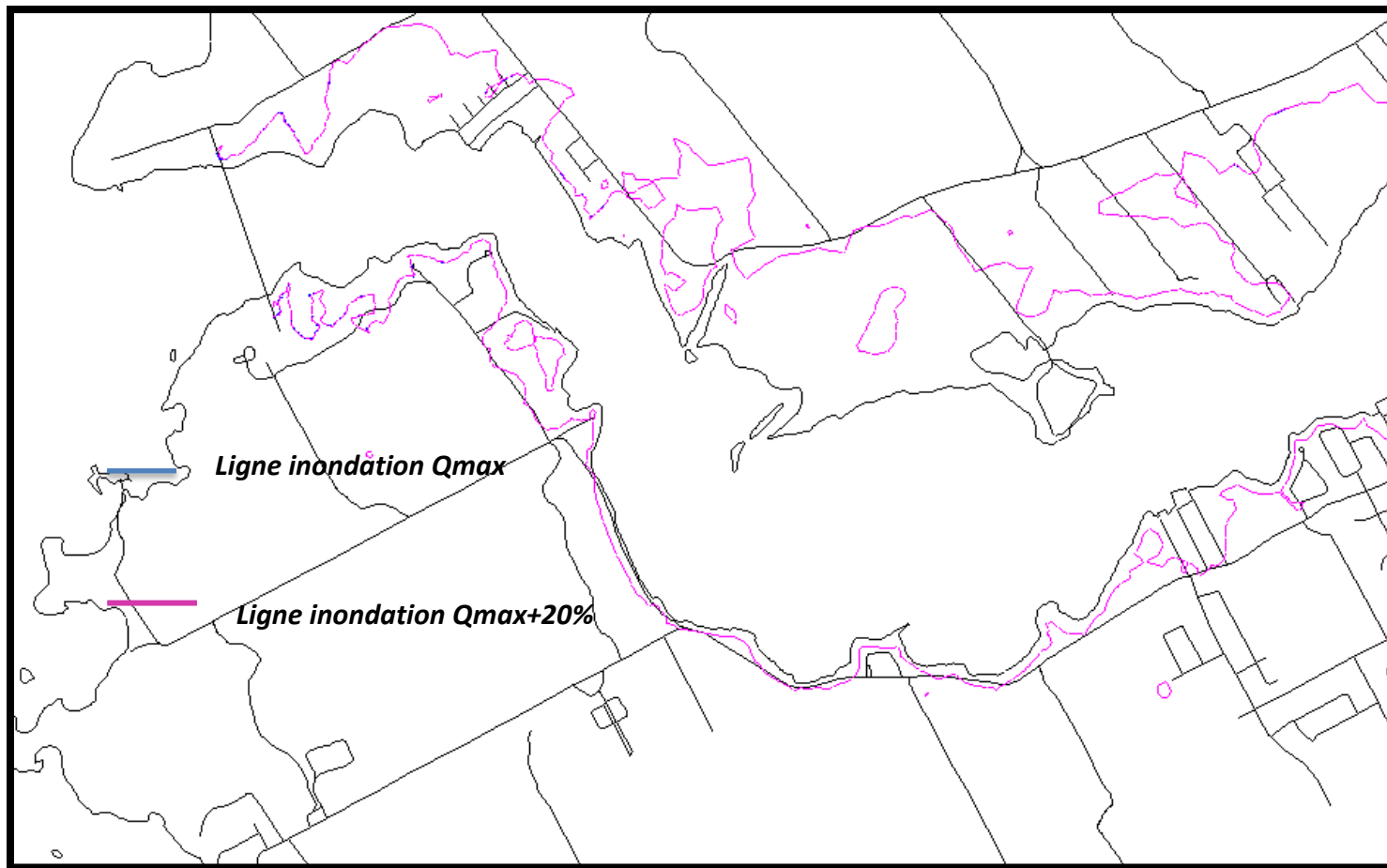


Figure 6.3 : Limite de la zone inondable de Pk=0 à Pk= 6 pour les cas du Q_{max} et $Q_{max}+20\%$

(secteur amont du barrage)

CONCLUSION

Les modèles climatiques globaux et régionaux constituent actuellement un outil de prévision des caractéristiques du climat futur influencé par les CC. Toutefois, leur utilisation nécessite d'avoir suffisamment des données d'entrée ainsi que la disponibilité des scénarios climatiques adéquats.

Pour ce faire, les courbes IDF, développées par Mailhot et al. (2007) pour la région du Sud du Québec, obtenues des résultats des modèles climatiques, ~~de~~ la présente étude. Elle ~~suppose~~ que les précipitations du climat futur (2041-2070) dépendent de celles observées dans le climat potentiel (1961-1990).

Les hyétoigrammes de pluies futures ont été calculés en se basant sur la détermination de l'hyétoigramme de Chicago calculé à partir des données d'intensités tirées des courbes IDF, du climat de référence pour le cas du bassin versant de la Rivière-du-Nord. Un pourcentage de majoration déduit des résultats de Mailhot a été appliqué pour le cas d'une pluie de durée égale à 24 h avec une période de récurrence de 50 ans. L'application de ce pourcentage (1.5%) à l'hyétoigramme de Chicago de l'évènement du climat de référence permet d'obtenir l'hyétoigramme du même évènement pluvieux dans le climat futur 2041-2070.

La transformation des précipitations en débits a été mise en œuvre en utilisant le modèle hydrologique Hec-Hms, un modèle gratuit, fiable et simple à utiliser englobant divers modules de calcul des paramètres indispensables pour le calcul de l'hydrogramme de ruissellement à l'exutoire du bassin versant.

L'étude hydraulique a été mise en œuvre en utilisant le logiciel bidimensionnel Modeleur Hydrosim. L'utilisation de ce modèle permet de simuler le niveau de la rivière afin de vérifier l'état des ouvrages hydrauliques et de dégager les zones vulnérables aux inondations pour deux cas de débits.

Suite aux CC attendus pour la période allant de 2041 à 2070, les zones du côté nord de l'Île de Montréal pourront être vulnérables au rehaussement du niveau de l'eau dans la Rivière-des-Prairies. En effet, l'analyse de l'impact du rehaussement du niveau d'eau sur la zone riveraine située du côté de l'Île de Montréal a montré que la zone en amont du barrage d'Hydro-Québec est risqué majeur, de même que la zone du côté du pont Charles de Gaulle. La limite d'inondation

résultante de la simulation des deux débits et plus spécifiquement pour le cas du Q_{\max} est assez étendue pour pouvoir mettre en risque les biens et la population.

En ce qui concerne l'impact du rehaussement du niveau de la rivière sur les infrastructures existantes, ce dernier n'aura pas d'effets majeurs sur ces ouvrages hydrauliques. Le niveau de l'eau simulé est inférieur au niveau des tabliers des ponts.

En effet, l'étude de l'impact d'un scénario d'augmentation du débit ($Q_{\max}+20\%$) sur le niveau d'eau de la rivière et par conséquent sur l'étendue de la zone inondable a montré que les niveaux d'eau dans la rivière ne sont pas sensibles à l'augmentation du débit. Ainsi l'écart entre les limites d'inondation tracées pour les cas des deux débits simulés (Q_{\max} et $Q_{\max}+20\%$) est négligeable.

La prévision du comportement de la Rivière-des-Prairies dans le contexte du climat futur exige l'intervention en matière de prévention afin de protéger les zones vulnérables aux inondations.

Suite à notre étude, nous recommandons :

- Le rôle tampon (régularisation des débits amont) du lac des deux montagnes n'a pas été pris en compte dans la présente étude. Il serait intéressant de l'intégrer dans la modélisation du bassin Du Nord afin d'étudier son impact sur les niveaux d'eau de la Rivière-des-Prairies.
- Il serait également intéressant d'utiliser différents coefficients multiplicateurs du débit du barrage Carillon afin d'étudier son impact sur le débit à l'exutoire du bassin de la Rivière-du-Nord et par conséquent sur les niveaux d'eau dans la Rivière-des-Prairies.
- Le choix d'une pluie de durée 24 h et de période de retour de 50 ans n'est qu'un cas d'étude. Il est recommandé de simuler le bassin versant de la Rivière-du-Nord et par conséquent le rehaussement du niveau de la Rivière-des-Prairies, tout en utilisant des combinaisons (durée de pluie et période de retour) différentes.
- Une analyse de la vulnérabilité sociétale des zones inondables est recommandée sur une échelle plus détaillée, afin d'évaluer avec plus de précision le degré de la vulnérabilité des lieux et des populations.

- Il serait très intéressant d'étudier l'impact du rehaussement sur les installations en eaux potables ainsi que sur le réseau d'assainissement.
- Des plans d'urgence pourront être élaborés afin de bien préparer les interventions en cas d'inondations imprévisibles.

BIBLIOGRAPHIE

Abrinord, (2013). "Agence de Bassin versant de la rivière du Nord". Site Web consulté en Avril 2013 : <http://www.abrinord.qc.ca>

Abrinord, (2008). "Portrait et diagnostic du bassin versant de la rivière du Nord". Québec, 273p.

ASCE, (1992). "Design and construction of urban storm water management systems". USA, 686p

Anctil, F., Rousselle, J. et Lauzon, N. (2005). " Hydrologie : Cheminements de l'eau, 1^{ère} édition", Presses Internationales Polytechnique, 320p.

Boucher, J.P. (1978). "Cartographie des plaines d'inondation, Rivière-des-Prairies-ES-78-01, Service de l'hydrométrie". Ministère des Richesses naturelles. Québec.

Boucher, J.P, Picard, F. (1993). "Cartographie des zones inondables, villes de Laval- Rivière-des-Prairies -DH-93-04" . Direction du risque, ministère de l'Environnement, Québec.

CEHQ, (2013). Centre d'Expertise Hydrique du Québec.

<http://www.cehq.gouv.qc.ca/>

CEHQ, (2005). Centre d'Expertise Hydrique du Québec. "Rivière des Mille Îles : Étude des solutions de soutien des étiages critiques". Québec, 253 p.

Environnement Canada, (2013). Site web consulté en juillet 2013

<http://www.ec.gc.ca/default.asp?lang=Fr&n=FD9B0E51-1>

Environnement Canada, (2012). Site web consulté en Juin 2012 :

<http://www.ec.gc.ca/default.asp?lang=Fr&n=FD9B0E51-1>

Géo base, (2013). Site web consulté en Janvier 2013 :

<http://www.geobase.ca/geobase/fr/index.html>

GIEC, (2007). " Bilan 2007 des changements climatiques". Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A. GIEC. Genève, Suisse, ..., 103 pages.

IPCC, (2007). "Fourth Assessment Report: Climate Change 2007". Geneva, Switzerland. pp 104

- IPCC, (2000). "Special Report Emissions Scenarios". Geneva, Switzerland. pp 20
- King County. (2010). "Climate Change Impacts on River Flooding: State-of-the-Science and Evidence of Local Impacts". Préparé par Curtis deGasperi, Water and Land Resources Division. Seattle, Washington. pp 60
- Lajoie, P. G. (1960). "Les sols des comtés d'Argenteuil, Deux-Montagnes et Terrebonne". Services de recherches, ministère de l'agriculture du Canada en collaboration avec le ministère de l'Agriculture de Québec et le collège Macdonald, Université McGill.
- Lambert, S. (2011). " Impacts des changements climatiques sur la disponibilité de l'eau dans le sud du Québec". Sherbrook, Québec, Canada. 58p.
- Mailhot, A., Duchesne, S., Caya, D., & Talbot, G. (2007). "Assessment of future change in intensity–duration–frequency (IDF) curves for Southern Quebec using the Canadian Regional Climate Model (CRCM)". *Journal of Hydrology*, 347(1-2), 197–210.
- MDDEFP, (2013). Ministère du Développement durable, Environnement, Faune et Parcs. Site web consulté en Juillet 2013: http://www.mddefp.gouv.qc.ca/eau/eco_aqua/outaouais/intro.htm
- MDDEFP, (2011). Ministère du Développement durable, Environnement, Faune et des Parcs. Guide de gestion des eaux pluviales –chap 6: Evaluation quantitative du ruissellement-aspects hydrologiques, site consulté en mai 2012 : <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/pluviales/guide.htm>
- Neff, R., Chang¹, H., Gregory Knight¹, C., Najjar, R.G, Yarnal, B. et Walker, B.Y. (2000). "Impact of climate variation and change on Mid-Atlantic Region hydrology and water resources". Center for Integrated Regional Assessment and Atlantic Ecology Division, National Health and Environmental Effects Research Laboratory, US Environmental Protection Agency. Vol. 14: 207–218.
- Nijssen, B, O'Donnell, G.M., Hamlet, A.F. et Lettenmaier, D.P. (2001). "Hydrologic sensitivity of global rivers to climate change". University of Washington, USA, p143–175.
- Ouranos, (2013a). Site web consulté en Février 2013 : <http://www.ouranos.ca>
- Ouranos, (2013b). Site web consulté en Mai 2013 :
["http://www.ouranos.ca/media/publication/184_RapportThomasBleau2012.pdf"](http://www.ouranos.ca/media/publication/184_RapportThomasBleau2012.pdf)
- Ouranos, (2010). "S'adapter aux changements climatiques", Montréal, Québec. 124 p.

RCSCC, (2013). Réseau Canadien des Scénarios de Changements Climatiques Site web consulté en Avril 2013 : <http://www.cccsn.ec.gc.ca/?page=main&lang=fr>

MDCR, (2013). Réseau canadien en modélisation et Diagnostics du Climat Régional. Site web consulté en Avril 2013 : http://www.mrcc.uqam.ca/index.php?page=modeles_-fr.html&sm=sm4

Robitaille, J., (1999). "Regional Assessment-Lake of Two Mountains Sector-Priority". Intervention Zone 24. St. Lawrence Centre. 74 p.

Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B. , Tignor, M. et Miller, H.L. (2007). "The Physical Science Basis, contribution du Groupe de travail I au Quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'expert intergouvernemental sur l'évolution du climat". Cambridge University Press, Cambridge, United kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.

Souvignet, M., Gaese, H., Ribbe, L., Kretschmer, N. et Oyarzún, R. (2010). "Statistical downscaling of precipitation and temperature in north-central Chile: an assessment of possible climate change impacts in an arid Andean watershed". Hydrol. Sci. J.55(1), 41–57.

Statistique Canada, (2013). Site web consulté en Février 2013 : <http://www.statcan.gc.ca/pub/16-201-x/2007000/10542-fra.htm>

Vincent, L.A. et Mekis, É. (2006). "Changes in daily and extreme temperature and precipitation indices for Canada over the twentieth century ", Atmosphere Ocean, vol. 44, no 2, p. 177-193

Yagouti, A., Boulet, G., Vincent, L., Vescovi, L., et Mekis, É. (2008). "Observed changes in daily temperature and precipitation indices for southern Québec, 1960–2005. Atmosphere-Ocean, 46(2), 243–256

Yen, B., Chow, V.T. (1980). Design hyetographs for small drainage structures. ASCE. Journal of the hydraulics division, vol. 106

UQAM, 2013. Site web consulté en Avril 2013 :

http://www.er.uqam.ca/nobel/m100270/hydrologie_derterministe_classement.html

USACE. Army Corps of Engineers (2000a). "HEC Géo Hms (Hydrologic Modeling System): Hydraulic Reference Manual, US Army Corps of Engineers, Davis, California.

USACE. Army Corps of Engineers (2000b). "HEC Hms (Hydrologic Modeling System): Hydraulic Reference Manual, US Army Corps of Engineers, Davis, California